



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de los efectos de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje durante condiciones extremas de huracán

Jose Daniel Ríos Ocampo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Analysis of the effects of wave-current interaction in wave spectral modeling during extreme hurricane conditions

Jose Daniel Ríos Ocampo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2020

Análisis de los efectos de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje durante condiciones extremas de huracán

Jose Daniel Ríos Ocampo

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D., Andrés Fernando Osorio Arias

Codirector:

Ph.D., Ruben Darío Montoya Ramirez

Línea de Investigación:

Oceanografía e ingeniería costera

Grupo de Investigación:

OCEANICOS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2020

A mis padres y hermanos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a las siguientes personas e instituciones que me aportaron a lo largo de la maestría y especialmente en la realización de esta tesis.

A mi director de tesis Andrés Fernando Osorio y mi codirector Rubén Dario Montoya por la confianza, el apoyo y el conocimiento brindado durante estos años de realización de la tesis.

A los docentes del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia, que hicieron parte de este proceso integral de formación.

A Victor Saavedra por la paciencia y el conocimiento compartido. y las demás personas que conocí durante la maestría.

A Sebastián Álvarez y Daniel Correa por el apoyo y la moral durante estos años.

A Catalina Ospina por todo su cariño y comprensión.

Por último agradezco a mi familia, por el amor y el apoyo incondicional, a mis padres Luz Mary Ocampo y Elkin Ríos Toro, a mis hermanos Jhon, Carlos y Juan, y mi sobrino Juan Manuel, quienes me han acompañado en mis proyectos y decisiones.

Entender el comportamiento del oleaje extremo durante condiciones de viento de huracán permite diseñar y operar estructuras marinas (puertos y estructuras offshore) y predecir condiciones potencialmente peligrosas para las regiones costeras (erosión e inundación). Para esto, es crucial considerar la interacción de las componentes atmosférica y oceánica en la modelación espectral del oleaje y así caracterizar el comportamiento de las olas en condiciones débiles y extremas de vientos. Tradicionalmente, se han empleado parametrizaciones físicas y métodos computacionales para estimar los parámetros escalares y los espectros de energía del oleaje. Sin embargo, la necesidad de mayor precisión en los resultados para efectos prácticos ha resultado en el desarrollo de métodos que emplean el espectro completo de energía, es decir, teniendo en cuenta también el carácter vectorial del oleaje, también llamado espectro direccional. Esto es importante para las aplicaciones de ingeniería cuando se considera parámetros como la altura de ola significativa (H_s) y el período pico (T_p) que pueden conducir a errores significativos, por lo que resulta importante analizar el comportamiento de los espectros de energía.

En esta tesis, se presentan los resultados de la modelación espectral de los huracanes Katrina y Rita, considerando el efecto de la interacción ola-corriente. Las simulaciones se realizan con el modelo del oleaje WAVEWATCH III[®] (WWIII). El campo de vientos de huracán se obtiene combinando información de la base de datos de re-análisis NARR y el modelo paramétrico de vientos de huracán HURWIN, combinación conocida como HURNARR. Se analizan dos escenarios, usando las corrientes superficiales de las mediciones satelitales de AVISO e integrando el efecto del campo de velocidad de corrientes obtenido de la base de datos GLORYS. En particular, esta tesis estudia el efecto de la interacción ola-corriente en la variabilidad espacio-temporal de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s), período pico (T_p), y dirección pico del oleaje (θ_p). Se analiza la variabilidad de los términos fuente y sumidero $S(f)$ y los cambios en el espectro escalar de frecuencias $E(f)$ y el espectro direccional de energía $E(f, \theta)$. Además, se propone una metodología para cuantificar el efecto del campo de velocidades de corrientes 3D en el cálculo de los parámetros y espectros de energía del oleaje durante condiciones extremas de viento. La zona de estudio es el Golfo de México, localizado en la esquina sureste de Norteamérica y nordeste de Centroamérica, comprendida aproximadamente entre 18° N y 31° N y 79° W y 98° W. Las simulaciones en condiciones extremas de viento se realizan considerando el paso de los huracanes Katrina y Rita en Agosto y Septiembre de 2005, respectivamente. Con el fin de validar los resultados del modelo usando la metodología propuesta se comparan los resultados de la modelación espectral con la información disponible de las mediciones de las boyas 42001, 42002, 42036, 42038, 42039 y 42040 de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Los resultados obtenidos muestran que hay una estimación más adecuada de los parámetros escalares y espectros de energía del oleaje cuando se considera el efecto de la interacción del oleaje con las corrientes superficiales y profundas. Las conclusiones de esta tesis sugieren que

los resultados aquí obtenidos podrán ayudar en el diseño adecuado de estructuras marinas y a la prevención de desastres a causa de los huracanes.

Palabras clave: Oleaje extremo, vientos extremos, interacción ola-corriente, espectros de energía, perfil de corrientes, modelación espectral, WAVEWATCH III[®].

Understanding extreme wave behavior during hurricane wind conditions enables the design and operation of marine structures (ports, ships, and offshore structures) and predicts potentially dangerous conditions for coastal regions (erosion, flooding, sediment transport). For this, it is crucial to consider the interaction of the atmospheric and oceanic components in the waves' spectral modeling and thus characterize the behavior of the waves in extreme conditions of winds. Traditionally, computational methods have been used to estimate scalar parameters and wave energy spectra. However, the need for greater precision in simulations for practical purposes has resulted in the development of methods that use the full spectrum of energy, also taking into account the vector character of the waves. This study is essential for engineering applications when considering that assumptions based on only two parameters, such as significant wave height (H_s) and peak period (T_p), can lead to significant errors. Hence, it is essential to analyze the behavior of energy spectra. In this paper, the results of the spectral modeling of hurricanes Katrina and Rita are presented, considering the effect of the wave-current interaction. The simulations are carried out with the WAVEWATCH III® (WWIII) wave model. The hurricane wind field is obtained by combining information from the NARR reanalysis database and the parametric model of hurricane winds HURWIN, a combination known as HURNARR. The data on surface currents correspond to satellite measurements from AVISO. In particular, this work studies the effect of the wave-current interaction on the temporal and spatial behavior of the scalar parameters of significant wave height (H_s), peak period (T_p), and peak wave direction (θ_p); The behavior of the source and sink terms $S(f)$ and the changes in the scalar frequency spectrum $E(f)$ and the directional energy spectrum $E(f, \theta)$ are analyzed. The study area is centered on the Gulf of Mexico. Simulations in extreme wind conditions are carried out considering hurricanes Katrina and Rita in August and September 2005, respectively. To evaluate the quality of the model results, we use the proposed methodology; the spectral modeling results are compared with the information available from NOAA buoys 42001, 42002, 42036, 42038, 42039, and 42040. The results obtained show a better estimation of the scalar parameters and wave energy spectra when the effect of the wave interaction with surface currents is considered. This work's conclusions allow us to advance towards more precise models that will help the design of marine structures that resist extreme conditions and the prevention of disasters caused by hurricanes.

Keywords: Hurricane Waves, Directional Spectrum, Hurricane Winds, Wave-Current interaction, Spectral modeling, WaveWatchIII.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
1. Introducción	2
2. Zona de estudio y bases de datos	7
2.1. Zona de estudio	7
2.2. Descripción bases de datos	8
2.2.1. Datos batimetría	8
2.2.2. Datos boyas	8
2.2.3. Datos Vientos	10
2.2.4. Datos de corrientes	11
3. Marco Teórico	12
3.1. Ecuaciones de interacción ola-corriente	12
3.2. Modelo de oleaje WAVEWATCH III®	16
3.3. Términos fuente y sumidero	18
3.3.1. Interacción no lineal ola-ola S_{nl}	19
3.3.2. Interacción atmósfera-oleaje S_{in}	20
3.3.3. Interacción oleaje-océano S_{ds}	21
3.3.4. Término de entrada lineal S_{ln}	22
3.3.5. Interacción por fondo S_{bot}	23
3.4. Metodología vientos huracán	24
3.4.1. Modelo de Huracán HURWIN	24
3.4.2. Campo de vientos Huracán	24
3.4.3. Evaluación de resultados	27
4. Efecto de la interacción ola-corriente en los parámetros escalares del oleaje	28
4.1. Calibración y validación del modelo de oleaje WAVEWATCH III®	28
4.1.1. Calibración	28
4.1.2. Validación	36
4.2. Series temporales de los parámetros escalares del oleaje: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (θ_p).	39
4.2.1. Huracán Katrina	40

4.2.2. Huracán Rita	51
4.3. Análisis espacial de los parámetros del oleaje: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p).	60
4.3.1. Huracán Katrina	60
4.3.2. Huracán Rita	69
5. Efecto de la interacción ola-corriente en los espectros de energía del oleaje	74
5.1. Espectro escalar de frecuencias	75
5.1.1. Huracán Katrina	76
5.1.2. Huracán Rita	82
5.1.3. Error cuadrático medio de la energía para ambos huracanes	86
5.2. Espectro direccional de energía	88
5.2.1. Huracán Katrina	89
5.2.2. Huracán Rita	99
5.3. Espectro direccional de energía en los cuadrantes del huracán	108
5.4. Términos Fuente y sumidero	114
6. Modelación numérica de la interacción ola-corriente con perfil de corrientes	127
6.1. Descripción de la metodología	127
6.2. Campo de corrientes ponderado	131
6.3. Series temporales de los parámetros escalares del oleaje	134
6.4. Espectro escalar de frecuencias	138
6.5. Espectro direccional de energía	141
7. Conclusiones y recomendaciones	146
7.1. Conclusiones por objetivo	147
7.2. Recomendaciones	150
A. Anexo: Interacción no lineal ola-ola S_{nl}	151
B. Anexo: Interacción atmósfera-oleaje y océano-oleaje $S_{in} + S_{ds}$	153
C. Parámetros en la configuración y calibración del modelo WWIII	159
Bibliografía	161

Lista de Tablas

2-1.	Características de las boyas ubicadas en el Golfo de México.	8
4-1.	Parámetros empleados en el análisis de sensibilidad para las simulaciones con el modelo de oleaje (WWIII). Modificado de Montoya (2013)	32
4-2.	Parámetros estadísticos básicos de los parámetros escalares del oleaje durante el paso del huracán Katrina.	43
4-3.	Parámetros estadísticos básicos de los parámetros escalares del oleaje, durante el paso del huracán Rita.	54
5-1.	Máximo valor de energía en el espectro direccional por cuadrante.	112
A-1.	Constates predeterminadas en la DIA para los paquetes de entrada de disipación. .	152
B-1.	Constantes sugeridas en el paquete de términos fuente de Tolman y Chalikov KC denota Kahma y Calkoen (1992, 1994). La primera línea representa la configuración predeterminada del modelo.	158
C-1.	Principales parámetros empleados en la calibración y configuración del modelo de oleaje WWIII.	160

Lista de Figuras

2-1.	Zona de estudio. (A) Ubicación y batimetría (B) Localización de las boyas de la NOAA, y trayectoria de los huracanes Katrina (negro) y Rita (verde).	7
3-1.	Esquema del sistema de referencia de direcciones espectrales de las olas en presencia de un campo de corrientes. Figura modificada de (Holthuijsen, 2010).	12
3-2.	Cambio diferencial de cresta de la ola debido a variación de la magnitud del campo de corrientes en el espacio. Figura modificada de (Holthuijsen, 2010).	13
3-3.	Metodología para la corrección del campo de vientos del huracán Katrina. (A) Esquema de la metodología de vientos combinados de NARR y HURWIN, (B) Caso de aplicación de la metodología: Huracán Katrina. Tomada de Montoya (2013). . . .	25
3-4.	Comparación los campo de vientos de huracán. (A) NARR, (B) ERA5, (C) HURNARR, y (D) HRD. Los datos se presentan para el 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. Los vectores indican la dirección del viento. . .	26
4-1.	Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) obtenida con la configuración predeterminada del modelo de oleaje WWIII. (A) Comparación de la serie modelada y la serie medida por la boya 42001. (B) Dispersión de puntos de altura de ola significativa (H_s) y valores de los índices estadísticos. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.	28
4-2.	Análisis de sensibilidad de la resolución espacial en la modelación de la altura de ola significativa (H_s). La soluciones obtenidas tienen en cuenta resoluciones espaciales de 3,5, 7 y 18,5 kilómetros. Las figuras corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. Los vectores indican la dirección del oleaje.	29
4-3.	Análisis de sensibilidad de la resolución direccional en la modelación espectral de la altura de ola significativa (H_s). Las soluciones tienen en cuenta resoluciones direccionales de 5°, 10° y 20° grados. Las figuras corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. Los vectores indican la dirección del oleaje.	30

- 4-4.** Análisis de sensibilidad del coeficiente de calibración STABSH en la modelación de la altura de ola significativa (H_s). (A) Comparación entre las series temporales de altura de ola significativa (H_s) modeladas y las series medidas por la boya 42001 para valores STABSH $C_o = 1, 10, 1, 30, 1, 38, 1, 50$ (de arriba hacia abajo). (B) Dispersión de puntos de las series modeladas e índices estadísticos. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. 33
- 4-5.** Análisis de sensibilidad del coeficiente de calibración STABSH en la modelación del periodo pico (T_p). (A) Comparación entre las series temporales de periodo pico (T_p) modeladas y las series medidas por la boya 42001 para valores STABSH $C_o = 1, 10, 1, 30, 1, 38, 1, 50$ (de arriba hacia abajo). (B) Dispersión de puntos de las series modeladas e índices estadísticos. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. 34
- 4-6.** Optimización del parámetro STABSH (C_0) con el error cuadrático medio (RMSE). RMSE de la altura de ola significativa (H_s) durante el huracán (A) Katrina y (B) Rita. RMSE del periodo pico (T_p) durante huracán (C) Katrina y (D) Rita. 35
- 4-7.** Validación de la calibración del modelo de oleaje WWIII, durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de la serie temporal de altura de ola significativa (H_s) con los datos medidos por la boya 42039, y dispersión de puntos con los valores de los índices estadísticos. (B) Comparación de la serie temporal de periodo pico (T_p), dispersión de puntos e índices estadísticos. 36
- 4-8.** Validación de la calibración del modelo de oleaje WWIII, durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de la serie temporal de altura de ola significativa (H_s) con los datos medidos por la boya 42039, y dispersión de puntos con los valores de los índices estadísticos. (B) Comparación de la serie temporal de periodo pico (T_p), dispersión de puntos con e índices estadísticos. 37
- 4-9.** Trayectoria de los huracanes Katrina y Rita, y ubicación de las boyas seleccionadas para validar los resultados obtenidos con la modelación espectral de los parámetros escalares del oleaje. Los colores representan la categoría del huracán de la siguiente forma: Tormenta tropical (ST-Verde), Huracán categoría 1 (H1-Amarillo), categoría 2 (H2-Naranja), categoría 3 (H3-Rojo), categoría 4 (H4-Rosado), y categoría 5 (H5-Morado). Las fechas corresponden al periodo 28/08/2005 00:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, en el caso del huracán Katrina, y al periodo 20/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, en el caso del huracán Rita. 39
- 4-10.** Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s), durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de las series temporales de H_s calculadas con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas y valores de los índices estadísticos. 40

-
- 4-11.** Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de periodo pico (T_p), durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de las series temporales de T_p calculado con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de periodo pico (T_p) y el valor de los índices estadísticos. 41
- 4-12.** Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de dirección pico del oleaje (θ_p), durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de las series temporales de dirección pico del oleaje (θ_p) calculado con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42003, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de dirección pico (θ_p) y el valor de los índices estadísticos. 42
- 4-13.** Cambios en la magnitud de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. Diferencia y error porcentual de (A) H_s y (B) T_p . Las series se obtienen en los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. El recuadro negro indica el periodo del huracán (23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00). 45
- 4-14.** Dirección de la corriente (flecha de color) y dirección del oleaje (flecha negra). Se presenta la diferencia porcentual de las series temporal de altura de ola significativa (H_s) estimada con la ecuación 4-4. El recuadro negro indica el periodo del huracán Katrina (23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00). 48
- 4-15.** Relación de la dirección relativa α y el asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s). (A) Dirección de las corrientes de AVISO y dirección del oleaje modelado. (B) Dirección relativa entre el oleaje y las corrientes α . (C) asomeramiento o disminución de la altura de ola significativa (H_s). (D) Diferencias porcentuales de altura de ola significativa (H_s). El recuadro negro indica el periodo del huracán Katrina (23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00). 49
- 4-16.** Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s), durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de las series temporales de altura de H_s calculada con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de altura de ola significativa (H_s) y valores de los índices estadísticos. 51

- 4-17.** Efecto de la interacción ola corriente en el parámetro escalar de periodo pico (T_p), durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de las series temporales de periodo pico (T_p) calculado con el modelo de oleaje (WWIII), teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de periodo pico (T_p) y el valor de los índices estadísticos. 52
- 4-18.** Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de dirección pico del oleaje (θ_p), durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de las series temporales de θ_p calculada con el modelo de oleaje WWIII teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de θ_p y valores de los índices estadísticos. 53
- 4-19.** Cambios en la magnitud de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. Diferencia y error porcentual de (A) H_s y (B) T_p . Las series se obtienen en la ubicación de las boyas de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. El recuadro negro indica el periodo del huracán (19/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00). 55
- 4-20.** Dirección de la corriente y dirección del oleaje. Se presenta el error porcentual que se obtiene. El periodo de simulación corresponde al paso del huracán Rita. El recuadro negro indica el periodo del huracán (19/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00). 57
- 4-21.** Relación de la dirección relativa α y el asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s). (A) Dirección de las corrientes de AVISO y dirección del oleaje modelado. (B) Dirección relativa entre el oleaje y las corrientes. (C) Asomeramiento o disminución de la altura de ola significativa (H_s). (D) Diferencia porcentuales de altura de ola significativa (H_s). El análisis se realiza para los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040, durante el periodo del huracán Rita. El recuadro negro indica el periodo del huracán (19/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00). 58
- 4-22.** Variación espacial de altura de ola significativa (H_s) sin tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, durante el paso del huracán Katrina. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, con un paso de tiempo de 6 horas. Los vectores indican la dirección del oleaje y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al centro del huracán. 60
- 4-23.** Variación espacial de altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto del campo de velocidad de corrientes superficiales de AVISO. Los datos corresponden al paso del huracán Katrina. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, cada 6 horas. Los vectores indican la dirección del oleaje y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 62

-
- 4-24.** Comparación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral, durante el paso del huracán Katrina. (A) Simulación con vientos de huracán (H_s HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (H_s AVISO), (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (H_s DIF), y (D) Error porcentual de altura de ola significativa (H_s). Los vectores indican la dirección del oleaje y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 63
- 4-25.** Comparación de la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, durante el paso del huracán Katrina. (A) Patrón espacial de altura de ola significativa (H_s AVISO) y datos del campo de corrientes de AVISO. (B) Diferencias de altura de ola significativa (H_s) al incluir el campo de corriente y los datos del campo de corrientes. Los vectores indican la dirección de las corrientes y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 65
- 4-26.** Solución espacial del parámetro de periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto del campo de velocidad de corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Katrina. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, cada 6 horas. Los vectores indican la dirección de las corrientes y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 66
- 4-27.** Comparación del patrón espacial del periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral. (A) Simulación con vientos de huracán y sin corrientes (T_p HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (T_p AVISO) (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (T_p DIF). (D) Error porcentual del periodo pico (T_p). Los vectores indican la dirección de las corrientes y los puntos negros la trayectoria del huracán Katrina. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 68
- 4-28.** Comparación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral, durante el paso del huracán Rita. (A) Simulación con vientos de huracán (HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (AVISO) (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (H_s DIF). (D) Error porcentual de altura de ola significativa (H_s). Los vectores indican la dirección del oleaje. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 69

- 4-29.** Comparación de la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, durante el paso del huracán Rita. (A) Patrón espacial de altura de ola significativa (H_s AVISO) y datos del campo de corrientes de AVISO (Vectores). (B) Diferencias de altura de ola significativa (H_s) al incluir el campo de corriente y los datos del campo de corrientes. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. 71
- 4-30.** Comparación del patrón espacial del periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral. (A) Simulación con vientos de huracán (T_p HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (T_p AVISO) (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (T_p DIF). (D) Error porcentual del periodo pico (T_p). Los vectores indican la dirección del oleaje. Huracán Rita. 72
- 5-1.** Ubicación de las boyas de la NOAA y trayectoria de los huracanes, para el análisis del espectro escalar de frecuencias. (A) Ubicación de las boyas 42001 y 42038, y categorías del huracán Katrina. (B) Ubicación de las boyas 42002 y 42040, y categorías del huracán Rita. Los instantes de tiempo en los que se presentan los resultados de la modelación del espectro escalar de frecuencias, corresponden a las fechas 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, cada 6 horas, en el caso del huracán Katrina. En el caso del huracán Rita, se analiza los resultados para las fechas 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00. 75
- 5-2.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, cada 6 horas. Los espectros corresponden al paso del Huracán Katrina. SC corresponde a la solución obtenida de los espectros escalares de frecuencia que no tienen en cuenta el campo de corrientes; C corresponde a las simulaciones que incluyen el campo de corrientes y B son los datos medidos por las boyas de la NOAA de los espectros escalares de energía. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos. 76

-
- 5-3.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias $E(f)$. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42038 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, corresponde al paso del Huracán Katrina. SC corresponde a la solución del espectro escalar de frecuencia $E(f)$ que no tienen en cuenta el campo de corrientes; C corresponde a las simulaciones que incluyen el campo de corrientes y B son los datos medidos por las boyas de la NOAA de los espectros escalares de energía. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos. 78
- 5-4.** Error porcentual del espectro de energía de frecuencias. Diferencia entre el espectro modelado teniendo en cuenta la interacción ola-corriente y el espectro que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes, para los puntos que corresponden a las boyas 42001 y 42038 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina. 81
- 5-5.** Efecto de las corrientes en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42002 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00 corresponde al paso del Huracán Rita. SC corresponde a la solución obtenida de los espectros escalares de frecuencia que no tienen en cuenta el campo de corrientes; C corresponde a las simulaciones que incluyen el campo de corrientes y B son los datos medidos por las boyas de la NOAA de los espectros escalares de energía. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos. 82
- 5-6.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, corresponde al paso del Huracán Rita. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos. 83
- 5-7.** Error porcentual del espectro de energía de frecuencias. Diferencia entre el espectro modelado teniendo en cuenta la interacción ola-corriente, y el espectro que no tienen en cuenta el efecto de las corrientes, para los puntos que corresponden a las boyas 42002 y 42040 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, que corresponde al paso del Huracán Rita. 85

5-8.	Error cuadrático medio del espectro escalar de energía. (A) Comparación de los espectros escalares modelados con los datos medidos por las boyas 42001 y 42038 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (B) Comparación de los espectros escalares modelados con los datos medidos por las boyas 42002 y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita.	87
5-9.	Ubicación de las boyas 42001, 42036 y 42040 de la NOAA y trayectoria del huracán Katrina y Rita, para el análisis de los espectros direccionales de energía.	88
5-10.	Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42001 de la NOAA, para las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.	89
5-11.	Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42040 de la NOAA, para las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.	90
5-12.	Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.	92
5-13.	Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.	93
5-14.	Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Análisis del error cuadrático medio para cada dirección y cada frecuencia del espectro direccional de energía a partir de la ecuación 5-4. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42001, y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina.	95
5-15.	Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42001, 42036 y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina.	97

-
- 5-16.** Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42001 de la NOAA, para las fechas 22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes. 99
- 5-17.** Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42040 de la NOAA, para las fechas 22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes. 100
- 5-18.** Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42036 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 23/09/2005 00:00:00, 23/09/2005 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes. 102
- 5-19.** Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 23/09/2005 00:00:00, 23/09/2005 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes. 103
- 5-20.** Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Análisis del error cuadrático medio para cada dirección y cada frecuencia del espectro direccional de energía. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42036, y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Los recuadros negros indican los rangos de frecuencia y dirección donde se concentra la mayor energía del espectro. 104
- 5-21.** Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42036 y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. 106
- 5-22.** Ubicación de los espectros por cuadrante. Se tienen en cuenta los instantes de tiempo 108

- 5-23.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los espectros de energía por cuadrante. (A) Espectros direccionales de energía modelados con y sin corrientes, en cada cuadrante del huracán. (B) Espectro escalar de frecuencias, espectro de direcciones y parámetros escalares del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 00:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. 109
- 5-24.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los espectros de energía por cuadrante. (A) Espectros direccionales de energía modelados con y sin corrientes, en cada cuadrante del huracán. (B) Espectro escalar de frecuencias, espectro de direcciones y parámetros escalares del oleaje. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 06:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina. 110
- 5-25.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los espectros de energía por cuadrante. (A) Espectros direccionales de energía modelados con y sin corrientes, en cada cuadrante del huracán. (B) Espectro escalar de frecuencias, espectro de direcciones y parámetros escalares del oleaje. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 12:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina. 111
- 5-26.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina, en la ubicación de la boya 42001 de la NOAA. 115
- 5-27.** Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, que corresponde al paso del Huracán Rita en la ubicación que corresponde a la boya 42002 de la NOAA. 116
- 5-28.** Error porcentual del efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 18:00:00 hasta 29/08/2005 18:00:00, corresponde al paso del Huracán Katrina, en la ubicación que corresponde a la boya 42001 de la NOAA. 121
- 5-29.** Error porcentual del efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, corresponde al paso del Huracán Rita, en la ubicación que corresponde a la boya 42002 de la NOAA. 122
- 5-30.** Análisis cualitativo de la variación de la dirección del oleaje al tener en cuenta el efecto de las corrientes, y la relación con los cambios en los términos fuente/Sumidero. (A) Superposición del campo de corrientes (flecha verde), dirección del viento (flecha roja) y dirección del oleaje (flecha negra y azul), además se presentan la ubicación de la boya 42001 (punto negro). (B) Términos fuente y sumidero, con y sin corrientes. Los resultados presentados corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, cada 12 horas, durante el paso del huracán Katrina. 123

-
- 5-31.** Análisis cualitativo de la variación de la dirección del oleaje al tener en cuenta el efecto de las corrientes, y la relación con los cambios en los términos fuente/Sumidero. (A) Superposición del campo de corrientes (flecha verde), dirección del viento (flecha roja) y dirección del oleaje (flecha negra y azul), además se presentan la ubicación de la boya 42002 (punto negro). (B) Términos fuente y sumidero, con y sin corrientes. Los resultados presentados corresponden a las fechas 23/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, cada 12 horas, durante el paso del huracán Rita. 124
- 6-1.** Metodología para incluir el efecto del perfil de velocidad de corrientes en la modelación espectral. (1) Cálculo de las variables definidas en la ecuación de ponderación de corrientes, (2) Método de integración para obtener el campo de corrientes ponderado, (3) Modelación espectral de oleaje y validación de los resultados obtenidos de los parámetros escalares y espectros de energía. 129
- 6-2.** Campo de corrientes ponderado. (A) Campo de velocidad corrientes superficiales GLORYS, (B) Campo de corrientes ponderado, y (C) Diferencia entre el campo de corrientes ponderadas y el campo de corrientes superficiales. El campo de corrientes ponderado corresponde a una profundidad de integración de 30 metros, durante el paso del huracán Rita, en categoría 5. Los datos corresponden a la fecha 22/09/2005 12:00:00. 131
- 6-3.** Campo de corrientes ponderado para las diferentes profundidades de integración. (A) Velocidad zonal de corrientes, (B) Diferencia de velocidad zonal, (C) Velocidad meridional de corrientes, y (D) Diferencia velocidad zonal. 132
- 6-4.** Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Katrina. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencia de magnitud; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias de magnitud. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán. 134
- 6-5.** Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Katrina. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencias de magnitud; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias de magnitud. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42039 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán. 135

- 6-6.** Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Rita. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencias; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán. 136
- 6-7.** Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Rita. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencias; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán. 137
- 6-8.** Efecto de campo de corrientes ponderado en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00, con pasos de tiempo de 6 horas, el periodo corresponde al paso del Huracán Katrina. Además, se presenta la magnitud de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s , en metros) y periodo pico (T_p , en segundos), calculados a partir de los espectros modelados y los espectros medidos. 138
- 6-9.** Efecto del campo de corrientes ponderado en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 23/09/2005 00:00:00 hasta 23/09/2005 18:00:00, con pasos de tiempo de 6 horas, el periodo corresponde al paso del Huracán Rita. Además, se presenta la magnitud de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s , en metros) y periodo pico (T_p , en segundos), calculados a partir de los espectros modelados y los espectros medidos. 139
- 6-10.** Error cuadrático medio y error porcentual del espectro escalar de energía. (A) Comparación de los espectros escalares modelados con los espectros medidos por la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (B) Comparación de los espectros escalares modelados con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la máxima categoría del huracán. 140
- 6-11.** Efecto del campo de corrientes ponderado en el comportamiento del espectro direccional de energía, durante el paso del huracán Katrina. (A) Espectro con corrientes superficiales, (B) Espectro para $d = 15$ metros, (C) Espectro para $d = 30$ metros, (D) Espectro para $d = 45$ metros, (E) Espectro para $d = 60$ metros, y (F) Espectro medido por la boya 42001. 141

-
- 6-12.** Efecto del campo de corrientes ponderado en el espectro de energía, durante el paso del huracán Rita. (A) Espectro con corrientes superficiales, (B) Espectro para $d = 15$ metros, (C) Espectro para $d = 30$ metros, (D) Espectro para $d = 45$ metros, (E) Espectro para $d = 60$ metros, y (F) Espectro medido por la boya 42040. 142
- 6-13.** Error cuadrático medio y error porcentual del espectro direccional de energía. (A) Comparación de los espectros direccionales modelados con los espectros medidos por la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (B) Comparación de los espectros direccionales modelados con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la máxima categoría del huracán. 143

1. Introducción

Los huracanes, también conocidos como ciclones tropicales, son algunos de los eventos climáticos más energéticos y destructivos del mundo, que producen velocidades extremas de viento y de altura de olas (Halverson & Rabenhorst, 2013). El campo de velocidad dentro de un huracán produce un forzamiento intenso y rápido sobre la superficie del mar que genera ondas que varían en el espacio y el tiempo, las cuales se pueden propagar desde el centro de la tormenta (Barber & Ursell, 1948; Moon et al., 2003; Hu & Chen, 2011; Montoya et al., 2013). Estos eventos se presentan principalmente en el Golfo de México, y su frecuencia e intensidad ha venido en aumento en los últimos años y con consecuencias económicas para las regiones costeras. El oleaje combinado con las velocidades extremas del viento, pueden generar olas que alcanzan alturas mayores a 15 metros y se propagan hasta la zona costera produciendo inundaciones (Xie et al., 2008; Dietrich et al., 2011; Bennett et al., 2018; Liu et al., 2020), y daños en la infraestructura (Romanok et al., 2016; Sahoo et al., 2019). El oleaje extremo también modifica las costas como consecuencia de la erosión y del transporte de sedimentos (Liang et al., 2007; Olabarrieta et al., 2012; Benetazzo et al., 2013; Siki-rić et al., 2013; Xu et al., 2016; Adams et al., 2017; Sahoo et al., 2019). Estas consecuencias de los huracanes indican la importancia y necesidad de obtener una mejor estimación del comportamiento del oleaje, generado por condiciones extremas de viento, para predecir condiciones potencialmente peligrosas para las regiones costeras (erosión e inundación). Con este fin, es importante tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente durante condiciones extremas de huracán para la estimación precisa de los parámetros escalares y espectros de energía del oleaje.

En los años 70's diferentes investigadores lograron avances en el entendimiento de la interacción ola-corriente teniendo en cuenta los estudios pioneros de Longuet-Higgins & Stewart (1960, 1961, 1962, 1964). Jonsson et al. (1970) presentaron un método gráfico para calcular la longitud de onda en un campo de corrientes, y Peregrine (1976) incluyó en la ecuación de la relación de dispersión el efecto de una corriente permanente. Otras investigaciones como las de Phillips & Banner (1974) y Jonsson et al. (1978) sugieren las expresiones para determinar la densidad de energía de las olas y el flujo de energía, considerando ondas de variación lenta que se propagan en un campo de corrientes que varía linealmente con la profundidad, con una vorticidad constante ω . Stewart & Joy (1974), proponen una expresión matemática que permite calcular el campo de velocidad de corrientes ponderado en superficie, teniendo en cuenta el efecto de las corrientes en aguas profundas; luego esta expresión es ajustada para profundidades finitas por Kirby & Chen (1989). Las formulaciones propuestas explican que las ondas cortas solo sienten la corriente cerca de la superficie mientras que las ondas más largas son moduladas por todo el perfil de corrientes.

Con el avance computacional, se han desarrollado modelos atmosféricos, oceánicos y de oleaje, que permiten solucionar las ecuaciones que describen los fenómenos de interacción ola-corriente por medio de métodos numéricos. Los continuos esfuerzos en la modelación numérica del oleaje (Komen, Cavaleri, Donelan, Hasselmann, Hasselmann & Janssen, Komen et al.) se han enfocado en modelos espectrales. Algunos de los modelos desarrollados son WAM (Group, 1988), WAVEWATCH III® o WWIII (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019) y SWAM (Booij et al., 1999). WAM y WWIII son modelos de aguas profundas y utilizados para el modelado regional y global (Samiksha et al., 2017; Umesh et al., 2019), mientras SWAN es un modelo adecuado para la modelación en aguas someras (Holthuijsen, 2010; Swain et al., 2019). Empleando este tipo de modelos es posible estudiar el efecto de la interacción atmosférica y oceánica con el oleaje, tanto en condiciones débiles y extremas de viento. Así, los modelos sirven para obtener información de parámetros escalares como de espectros de energía del oleaje.

El espectro direccional describe las olas generadas por el viento en términos de contribuciones de las ondas que se propagan en diferentes direcciones con diferentes frecuencias, en particular en los huracanes es necesario esta descripción. En esta línea de investigación son muchas las contribuciones significativas en los últimos 20 años. Wright et al. (2001) y Walsh et al. (2002) estudiaron por primera vez la variación espacial de los espectros direccionales en época de huracanes cuando se encuentran en océano abierto y cerca a la plataforma continental, utilizando mediciones del Altímetro de radar de exploración (SRA) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Moon et al. (2003) estudiaron el comportamiento del espectro direccional, durante el paso del huracán Bonnie, empleando el modelo espectral de oleaje WWIII, donde encontraron que el oleaje generado por huracanes está determinado por el radio de vientos máximos y la velocidad de traslación del huracán. Estos autores, compararon los resultados de la modelación con datos satelitales, concluyendo que el modelo WWIII, reproduce adecuadamente el comportamiento de los espectros direccionales de energía en condiciones de huracán. Walsh et al. (2002) estudiaron el efecto del huracán Bonnie en el comportamiento de los espectros direccionales en los diferentes cuadrantes del huracán, donde encontraron que la distribución de la energía en el espectro direccional depende de la ubicación relativa con respecto al centro del huracán y la dirección de traslación. Zhou et al. (2008) realizaron simulaciones numéricas, usando WWIII, durante el paso de un tifón en el sur de China, donde encontraron que las características espaciales de los parámetros del oleaje y el espectro direccional dependen de la posición relativa al centro del tifón. Liang et al. (2008) emplearon el modelo de oleaje SWAN y el modelo de corrientes COHERENS, para simular el comportamiento de la altura de ola significativa (H_s) y el periodo asociado al pico espectral (T_p). Choi et al. (2009) identificaron que es necesario tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la refracción del oleaje cuando se produce la rotura en una zona somera. Hu & Chen (2011) usaron el modelo de oleaje SWAN para estudiar el comportamiento del espectro direccional de olas durante condiciones de huracán en el Golfo de México, obteniendo la forma de los espectros de ola bimodales bajo vientos extremos. Olabarrieta et al. (2012) investigaron las interacciones entre la atmósfera, el océano y el oleaje, durante el paso del huracán Ida, en el Golfo de México. Para esto emplearon el modelo de transporte acoplado COAWST, y analizaron los efectos de las variaciones de la rugosidad del océano, de acuerdo a la intensidad de los vientos y las corrientes superficiales.

Huang et al. (2013) utilizaron el modelo de oleaje SWAN para estudiar la sensibilidad de los coeficientes de arrastre del viento en condiciones de huracán en olas de aguas profundas, y determinaron que la configuración predeterminada de entrada de viento es adecuada para huracanes y produce predicciones confiables. Montoya et al. (2013) realizaron un análisis de la distribución de la energía en el espectro direccional dependiendo del cuadrante, respecto a la dirección de traslación del huracán y a la distancia al centro de la tormenta. Además realizaron una comparación de los modelos de oleaje SWAN y WWIII en condiciones extremas de viento, durante el paso del huracán Katrina, en el Golfo de México. Los autores analizaron el comportamiento de los parámetros escalares y espectros direccionales del oleaje, obteniendo mejores resultados con el modelo de oleaje (WWIII), empleando el modelo paramétrico de vientos de huracán HURWIN. Montoya (2013) realizó un análisis del efecto de la interacción ola-corriente en la estimación de los parámetros escalares del oleaje, en condiciones débiles de viento, en el Caribe, donde encontró que el efecto de las corrientes superficiales, no produce un efecto significativo en el cálculo de los parámetros escalares del oleaje. Benetazzo et al. (2013) estudiaron el efecto de la interacción ola-corriente, empleando el modelo de transporte acoplado COAWST. En los resultados obtenidos encuentran que al tener en cuenta el sistema acoplado, hay variaciones de hasta 0,6 metros en la altura de ola significativa. Chen & Curcic (2016) utilizaron un modelo acoplado de atmósfera-ola-océano acoplado para estudiar los huracanes Ike (2008) y Sandy (2012), y comprender mejor la distribución espacial de los parámetros integrales y los espectros direccionales. Liu et al. (2016) obtuvieron una aproximación analítica de la interacción ola-corriente. Los resultados muestran que una corriente opuesta conduce a disminuciones significativas en la longitud de onda y tiende a estrechar tanto la cresta como el valle de la ola. Mientras que la elevación de la cresta de la ola aumenta a medida que aumenta la velocidad de la corriente opuesta. Samiksha et al. (2017) estudiaron la interacción ola-corriente durante el Ciclón HudHud, usando el modelo oceánico ADCIRC y el modelo de oleaje SWAN, realizando comparaciones entre la variación espacial que tiene la altura de ola significativa (H_s). Estos autores muestran que al tener en cuenta el campo de corrientes, hay una mejor estimación del oleaje, presentando diferencias de 0,3 metros y 2 segundos en H_s y T_p . Bennett & Mulligan (2017) estudiaron el paso del huracán Sandy, empleando el modelo paramétrico de vientos de Holland (1980) para representar sus condiciones extremas. Analizaron el comportamiento de los espectros en función de la frecuencia y la dirección dependiendo del cuadrante donde está ubicado con respecto al ojo del huracán. Luego (Bennett et al., 2018) analizaron el efecto de los vientos en las condiciones de oleaje extremo, donde obtuvieron el flujo de agua y los niveles dentro de una bahía acoplando los modelos SWAN y Delft3D. Abdolali et al. (2020) para el huracán Ike, utilizaron diferentes esquemas de solución y algoritmos de paralelización del modelo WWIII, para simular el estado del mar en la costa a alta resolución.

Diferentes investigaciones han tenido en cuenta el efecto de la interacción ola- corriente enfocándose en el análisis temporal y espacial de altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección asociada al pico espectral (θ_p) (Liang et al., 2008; Dietrich et al., 2011; Olabarrieta et al., 2012; Montoya, 2013; Benetazzo et al., 2013; Samiksha et al., 2017). Otras investigaciones han analizado el comportamiento de los espectros direccionales, durante condiciones de huracán, en el Golfo de México (Walsh et al., 2002; Moon et al., 2003; Hu & Chen, 2011; Montoya et al., 2013; Chen &

Curcic, 2016; Bennett et al., 2018). Sin embargo, son pocas las investigaciones que analizan el comportamiento del espectro en función de la frecuencia y la dirección cuando se incluye el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral durante condiciones de huracán (Chen & Curcic, 2016; Bennett et al., 2018). En general, la mayoría de estudios no cuantifican las variaciones producidas al incluir o no el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje durante condiciones extremas de viento de huracán. En esta investigación se cuantifican las variaciones que se presentan al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en los cálculos de los parámetros escalares y espectros del oleaje, durante condiciones extremas de viento de huracán. Las simulaciones numéricas se realizaron con el modelo de oleaje WAVEWATCH III[®] (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019). El campo de vientos de huracán se obtuvo combinando información de la base de datos de re-análisis NARR y usando el modelo paramétrico de vientos de huracán HURWIN (Montoya et al., 2013). Los datos de corrientes superficiales se obtuvieron de las mediciones satelitales de AVISO. Se estudió el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento temporal y espacial de H_s y T_p , se analizó el comportamiento espacial de los términos fuente y sumidero ($S(f)$), y los cambios en el espectro en función frecuencias ($E(f)$) y el espectro direccional ($E(f, \theta)$). Además, se propone una metodología para cuantificar el efecto del campo de velocidades de corrientes 3D, en el cálculo de los parámetros y espectros del oleaje, durante condiciones extremas de viento. Adicionalmente, utilizando el modelo numérico y el campo de viento mencionado, se realizaron estos mismo análisis utilizando el campo de velocidad de corrientes obtenido de la base de datos GLORYS. La zona de estudio es el Golfo de México, considerando el paso de los huracanes Katrina y Rita, que se presentaron en Agosto y Septiembre de 2005, respectivamente. Los resultados obtenidos con la modelación espectral fueron comparados con la información medida por las boyas 42001, 42002, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA, con el fin de evaluar la precisión de los resultados obtenidos.

Objetivos

Objetivo general

Determinar los efectos de la interacción ola-corriente por medio de la modelación espectral del oleaje durante condiciones extremas de huracán.

Objetivos específicos

- Definir una metodología de calibración y validación de un modelo espectral de oleaje para condiciones extremas de huracán.
- Analizar por medio de la modelación numérica las interacciones ola - corriente en la transformación de la energía espectral del oleaje bajo condiciones de huracán.
- Proponer una metodología que permita considerar el efecto del perfil de corrientes en el cálculo de los parámetros y espectros de energía del oleaje en un modelo de tercera generación.

Estructura de la tesis

El trabajo de grado está organizado de la siguiente forma: el capítulo 1 presenta la introducción y los objetivos de la tesis. El capítulo 2 describe la zona de estudio, las bases de datos usadas en la modelación espectral y la información utilizada para validar los resultados obtenidos. El capítulo 3 presenta las ecuaciones de interacción ola-corriente y las ecuaciones del modelo de oleaje WWIII (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019). Además, se presenta la metodología de vientos combinados utilizada para representar las condiciones extremas de viento durante huracán. En el capítulo 4 se muestran los resultados del efecto de la interacción ola-corriente en los parámetros integrales del oleaje en condiciones de huracán y en el capítulo 5 se explica el efecto de la interacción ola-corriente en los espectros de energía del oleaje y términos fuente y sumidero. En el capítulo 6 se desarrolla la metodología que permite tener en cuenta el efecto del perfil de corrientes en el cálculo de los parámetros y espectros del oleaje. El capítulo 7 presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo de grado. Finalmente se presenta las referencias bibliográficas y la información complementaria en los Anexos.

2. Zona de estudio y bases de datos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio es el Golfo de México, localizado en la esquina sureste de Norteamérica y nordeste de Centroamérica, que va entre los 18° N a 31° N en latitud y los 79° W a 98° W en longitud (Figura 2-1 A). El Golfo tiene una superficie cercana a los 1,5 millones de kilómetros cuadrados y está limitada en el norte por los Estados Unidos, suroeste y sur por México, y en el sureste por Cuba. Alrededor del 38 % del Golfo se compone de áreas poco profundas (20 m de profundidad) mientras que la plataforma continental (180 m de profundidad) representa aproximadamente el 22 % del área total y el restante 40 % está compuesto por aguas más profundas (Figura 2-1 A).

Se consideró esta zona de estudio, debido a la información disponible de los parámetros integrales y espectros de energía del oleaje medidos por las boyas de la NOAA. Las simulaciones en condiciones extremas de viento, se realizaron considerando el paso de los huracanes Katrina y Rita.

En la Figura 2-1 (derecha) se presenta la trayectoria de los huracanes Rita y Katrina, y la ubicación de las boyas de la NOAA, a partir de las cuales se validaron los resultados obtenidos con las simulaciones numéricas.

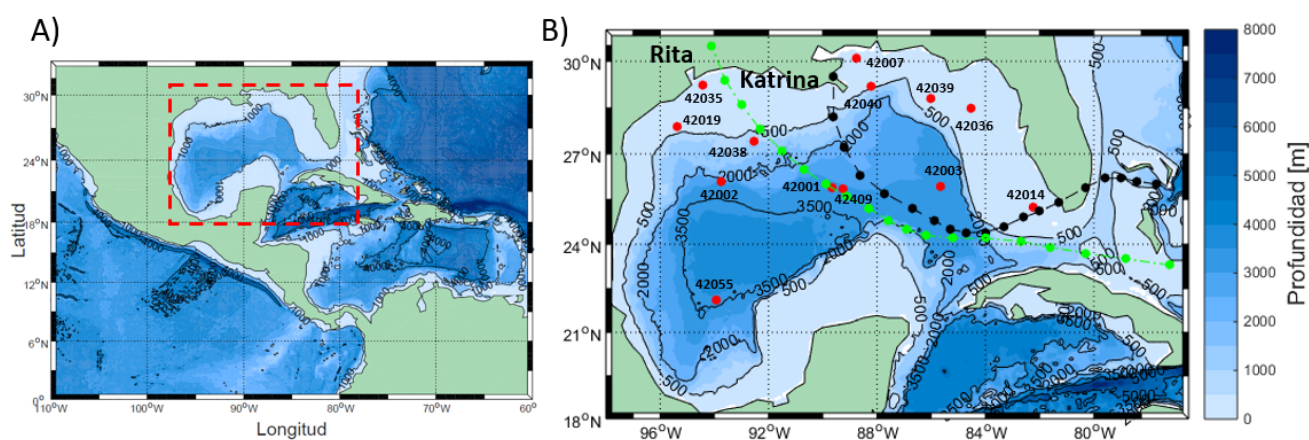


Figura 2-1.: Zona de estudio. (A) Ubicación y batimetría (B) Localización de las boyas de la NOAA, y trayectoria de los huracanes Katrina (negro) y Rita (verde).

2.2. Descripción bases de datos

En esta sección se describen de forma general las bases de datos utilizadas para realizar las simulaciones numéricas con el modelo de oleaje WAVEWATCH III[®] (WWIII).

2.2.1. Datos batimetría

La batimetría mostrada en la Figura 2-1 se obtuvo de la base de datos 1-min Gridded Global Elevation Data (ETOPO-1) disponible en <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>. ETOPO1 es un modelo de relieve que integra la topografía terrestre y la batimetría oceánica. Los datos tienen una cobertura de todo el mundo y una resolución espacial de 1 minuto de arco de la superficie de la tierra, lo que equivale a 1,852 km.

2.2.2. Datos boyas

Los datos para calibrar y validar el modelo de oleaje WWIII fueron obtenidos de la National Data Buoy Center (NDBC) y corresponden a boyas operacionales, disponibles en <http://www.ndbc.noaa.gov/>. Las boyas fueron seleccionadas teniendo en cuenta la disponibilidad de mediciones de los parámetros integrales (H_s , T_p y θ_p) y espectros del oleaje ($E(f)$ y $E(f, \theta)$). Además se tuvo en cuenta la ubicación relativa de las boyas con respecto a la trayectoria de los huracanes Katrina y Rita. Es importante tener en cuenta que en algunas ocasiones las mediciones realizadas por las boyas de la NOAA presentan dificultades durante condiciones de huracán, lo que limita la información disponible durante algunos periodos de tiempo. Además, que el espectro direccional es calculado mediante los métodos empleados por la NOAA (Montoya et al., 2013; Montoya, 2013). Otras variables asociadas a las boyas de la NOAA (coordenadas, años con información disponible, altura del anemómetro, tipo de boya y profundidad), y empleadas para validar los resultados obtenidos con el modelo WWIII, son presentadas en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1.: Características de las boyas ubicadas en el Golfo de México.

Boya	Coordenadas		Años Disponibles	Alt. Anen.[m]	Tipo Boya	Prof [m]
	Lon W°	Lat N°				
42001	-89.66	25.94	1975-2019	3.6	Direccional	3194
42002	-93.65	26.06	1996-2019	3.8	Direccional	3088
42036	-84.52	28.50	1994-2019	4.1	Direccional	49.7
42038	-92.56	27.42	2004-2006	4.1	Direccional	1152
42039	-86.01	28.79	1995-2019	4.1	Direccional	270
42040	-88.22	29.21	1995-2019	3.8	Direccional	183

La información disponible de las boyas de la NOAA, utilizada para calibrar/validar los resultados de las simulaciones numéricas fueron: altura de ola significativa (H_s) en metros, es aproximadamente igual al promedio del tercio más alto de las olas, medido desde la base hasta la cresta de las olas. Se calcula como 4 veces la raíz cuadrada del momento espectral cero (m_0), donde m_0 es la varianza de la serie de tiempo de desplazamiento de onda adquirida durante el período de adquisición de onda; periodo asociado al pico espectral (T_p) en segundos, el cual corresponde a la frecuencia asociada al valor más alto de energía del espectro; dirección asociada al pico espectral (θ_p) en grados, medidos desde el norte con orientación azimutal, que corresponde a la dirección de donde proviene la ola asociada a T_p . Además, se utilizó la información del espectro $E(f)$ en m^2/Hz , por medio del cual se puede calcular el espectro direccional $E(f, \theta)$ en $m^2/Hzdeg$, siguiendo la metodología de la NOAA a partir de la siguiente expresión (Holthuijsen, 2010):

$$E(f, \theta) = E(f)D(f, \theta) \quad (2-1)$$

donde, f es la frecuencia en Hz y θ es la dirección en grados, medido en sentido horario desde el norte verdadero hasta la dirección de donde proviene el oleaje, y $D(f, \theta)$, es la distribución direccional del oleaje, calculada como:

$$D(f, \theta) = \frac{1}{\pi} (0,5 + R_1 \cos(\theta - \alpha_1) + R_2 \cos(2(\theta - \alpha_2))) \quad (2-2)$$

donde, R_1 y R_2 son la primera y segunda coordenadas polares normalizadas de los coeficientes adimensionales de Fourier, α_1 y α_2 son respectivamente las direcciones media y principal. Estas variables se pueden expresar en términos de los coeficientes de Fourier (a_0, a_1, a_2, b_1, b_2), a partir de la siguiente expresiones:

$$R_1 = (\sqrt{(a_1 * a_1 + b_1 * b_1)})/a_0 \quad R_2 = (\sqrt{(a_2 * a_2 + b_2 * b_2)})/a_0 \quad (2-3)$$

$$\alpha_1 = 270,0 - \arctan(b_1, a_1) \quad \alpha_2 = 270,0 - (0,5 \arctan(b_2, a_2) + 0 \text{ o } 180). \quad (2-4)$$

La estimación del espectro direccional de energía ($E(f, \theta)$), obtenido a partir de los coeficientes mencionados, presenta inconsistencias que están asociadas con la dirección predominante del viento y las condiciones del mar en el sitio (Montoya et al., 2013). Otro factor importante que afecta la precisión del espectro direccional está relacionado con el método empleado para calcular la distribución direccional de energía $D(f, \theta)$ (ecuación 2-2), el cual utiliza los coeficientes de Fourier, desarrollado por Longuet-Higgins (1961).

2.2.3. Datos Vientos

Numerosas bases de datos de campos de viento como: North American Regional Reanalysis Center - NARR (NARR), NASA's QuikSCAT Scatterometer (QuikSCAT), National Centers for Environmental Prediction and Atmospheric Research reanalysis (NCEP1), y European Centre for Medium-Range Weather Forecast reanalysis (ECMWF, ERAinterim y ERA5), subestiman la magnitud de velocidad del viento en condiciones extremas de huracán (Cavaleri & Sclavo, 2006; Sharma & D'Sa, 2008; Ruti et al., 2008; Montoya, 2013). Esto en parte se debe a la baja resolución espacial y temporal de las bases de datos, que no permiten capturar con precisión la evolución de los fenómenos en las proximidades del ojo del huracán (asimetría, radio de viento máximo, velocidad máxima, y trayectoria), y los valores de magnitud y dirección del vientos usados en el proceso de asimilación. Por lo tanto, para mejorar este problema, algunos autores han propuesto metodologías para calcular el campo de vientos en condiciones de huracán (Holland, 1980; Lizano & Omar, 1990; Willoughby & Rahn, 2004; Visbal & Ortiz, 2006; Montoya, 2013). En nuestro caso, las simulaciones numéricas fueron realizadas teniendo en cuenta el campo de vientos de los huracanes Katrina y Rita, siguiendo la metodología propuesta por Montoya (2013). Esta consiste en combinar los datos de vientos de reanálisis NARR y el modelo paramétrico de vientos de huracán HURWIN, para obtener una aproximación adecuada de la magnitud y distribución espacial del campo de velocidad de vientos en condiciones de huracán.

Datos NARR

Las simulaciones numéricas se realizan con la base de datos North American Regional Reanalysis (NARR). NARR es un conjunto de datos mejorado del reanálisis I (NCEP/NCAR Reanalysis I) con alta resolución espacial y temporal, desarrollado por Center for Environmental Prediction (NCEP) y National Center for Atmospheric Research (NCAR). NARR emplea un Sistema Regional de asimilación de Datos Climáticos (R-CDAS) que es significativamente mejor que el reanálisis global del NCEP/NCAR (GR2) ya que tiene en cuenta el ciclo hidrológico regional, el ciclo diurno y otras características importantes de la variabilidad climática (Mesinger et al., 2006). El sistema de asimilación tiene una resolución espacial de 32 km y una resolución temporal de 3 horas en 29 capas verticales. La información está disponible en <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.narr.monolevel.html> en formato NetCDF. Los datos de viento zonal y meridional (U_{10} , V_{10}) de NARR están disponibles desde 1979/01/01 hasta 2020/01/01 con 8 datos por día. La resolución de la malla rectangular en la zona de estudio es de aproximadamente 32 kilómetros ($0,33^\circ$). Los datos de vientos utilizados en la simulación numérica corresponden al periodo de ocurrencia del huracán Katrina, desde 2005/08/01 hasta 2005/09/15; y los datos utilizados para modelar el paso del huracán Rita corresponden al periodo 2005/09/01 hasta 2005/10/15. La región de simulación se ubica entre los 18° N a 31° N en latitud y 79° W a 98° W en longitud, presentada en la Figura 2-1.

2.2.4. Datos de corrientes

El estudio del efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los parámetros integrales y espectros del oleaje, fue realizado inicialmente usando la información satelital del campo de velocidad de corrientes superficiales de la base de datos de AVISO. La metodología desarrollada en este trabajo, para tener en cuenta el efecto del perfil de velocidad de corrientes en la modelación espectral se realizó usando los datos de reanálisis de corrientes GLORYS, que tiene información del campo de velocidad de corrientes en diferentes niveles de profundidad. A continuación se hace una descripción general de la información antes mencionada.

Corrientes de AVISO

Los datos de corrientes superficiales de la base de datos de AVISO provienen de información satelital de altimetría. La información está disponible en <https://www.aviso.altimetry.fr/data.html> en formato NetCDF. Los datos tienen una resolución espacial aproximada de 25 kilómetros ($0,25^\circ$), y su resolución temporal es diaria, y es obtenida a partir de las mediciones satelitales de una semana. Los datos usados para modelar el huracán Katrina, van desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00; y en el caso del huracán Rita, corresponden al periodo 01/09/2005 00:00:00 hasta 15/10/2005 00:00:00. La región de simulación va aproximadamente de 18° N a 31° N en latitud y 79° W a 98° W en longitud, presentada en la Figura 2-1.

Corrientes de GLORYS

La información de los perfiles de velocidad de corrientes en sus componentes horizontales ($U(z), V(z)$), se obtuvieron del reanálisis Global Ocean Reanalysis and Simulations (GLORYS). GLORYS tiene como objetivo describir el estado medio de la circulación oceánica. En las últimas décadas, con las mediciones de altimetría satelital se ha obtenido información confiable sobre los remolinos oceánicos. Los datos de GLORYS que se usaron tienen una resolución temporal diaria, y una resolución espacial de 28 kilómetros ($0,25^\circ$). Los datos están disponibles para 71 niveles en profundidad que van desde 0,5 hasta 5000 metros de profundidad. En el caso del huracán Katrina, el periodo de datos va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00; y los datos usados para modelar el paso del huracán Rita, corresponden al periodo 01/09/2005 00:00:00 hasta 15/10/2005 00:00:00. La región de simulación va aproximadamente de 18° N a 31° N en latitud y 79° W a 98° W en longitud, presentada en la Figura 2-1.

3. Marco Teórico

3.1. Ecuaciones de interacción ola-corriente

La presencia de corrientes o las variaciones en la profundidad del océano pueden cambiar la amplitud, frecuencia y dirección del oleaje. Esto se debe, generalmente, a la acumulación de energía, la transferencia de energía entre las olas y las corrientes, el cambio de frecuencia (incluido el cambio Doppler) y la refracción inducida por las corrientes. La acumulación de energía (efecto de asomermiento) se explica con la ecuación de balance de energía, utilizando las celeridades modificadas del oleaje que se propaga a través de una corriente. La transferencia de energía entre olas y corrientes se explica reemplazando la densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ por la densidad de acción $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ en la ecuación de propagación del oleaje (ecuación 3-9). A continuación se presentan los esquemas y las ecuaciones para tener en cuenta el efecto del campo de corrientes en la refracción del oleaje y el cambio en las frecuencias (Holthuijsen, 2010). La Figura 3-1 presenta el esquema del sistema de referencia de direcciones definido para explicar el efecto que tiene la variación espacial del campo de corrientes en la dirección (θ) y en el cambio de las frecuencias (σ).

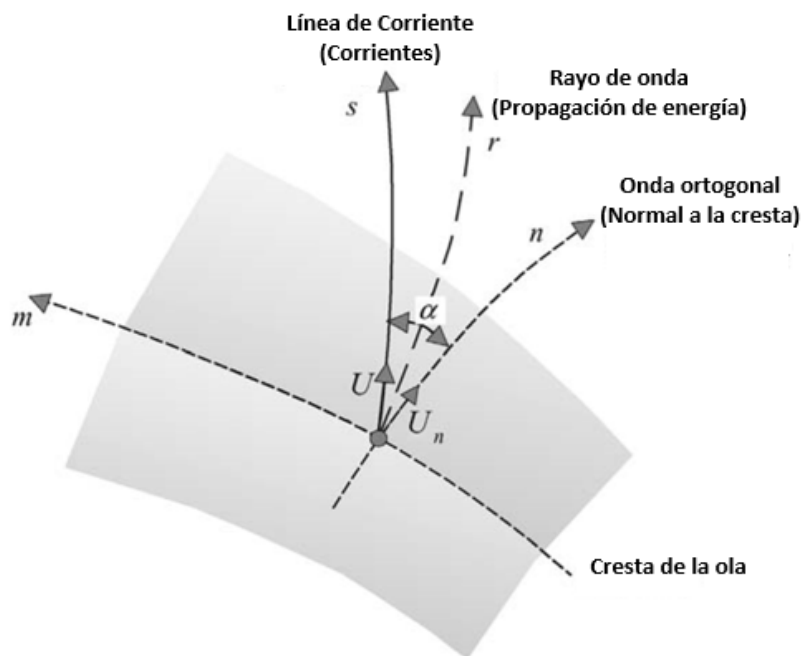


Figura 3-1.: Esquema del sistema de referencia de direcciones espectrales de las olas en presencia de un campo de corrientes. Figura modificada de (Holthuijsen, 2010).

La Figura 3-2 presenta el esquema para representar el efecto del campo de corrientes, en el giro de cresta de la ola. Se considera el incremento de la velocidad de las corrientes en la dirección del eje m que se define a lo largo de la cresta de la ola.

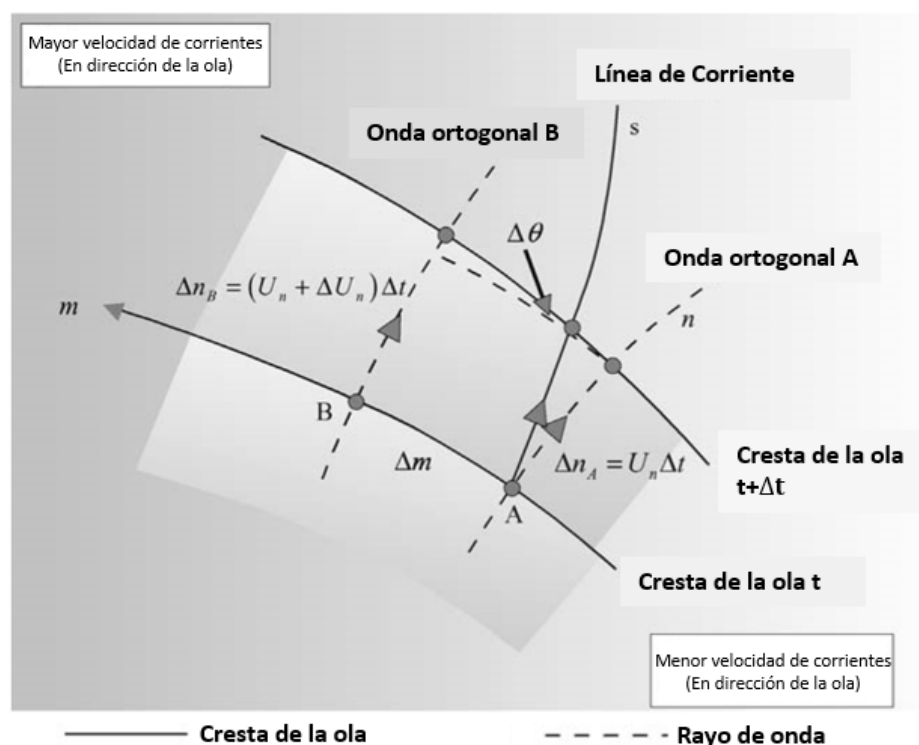


Figura 3-2.: Cambio diferencial de cresta de la ola debido a variación de la magnitud del campo de corrientes en el espacio. Figura modificada de (Holthuijsen, 2010).

Refracción

En la modelación espectral del oleaje en presencia de un campo de corrientes se hace una distinción entre varias direcciones: la dirección de la corriente (a lo largo de una línea de corriente), la dirección ortogonal de la ola (normal a la cresta de la ola) y la dirección de propagación de la ola (a lo largo del rayo de ola), como se presenta en la Figura 3-1. Cuando no se considera la presencia de corrientes, la energía viaja en la misma dirección que la ola (rayo de ola = ola ortogonal). Con la presencia de corrientes no se presenta este caso (rayo de ola \neq ola ortogonal). Luego, la energía es transportada en una dirección dada por la suma vectorial de la velocidad relativa de la velocidad de grupo C_g (a lo largo de la dirección de la ola ortogonal) y la velocidad de corriente U (a lo largo de la línea de corriente). Por lo tanto, la energía de las olas generalmente no se transporta en la dirección de las olas si hay presencia de corriente (parte de la energía viaja a lo largo de la cresta). La propagación de la ola a través de una corriente puede verse como la suma de la propagación de la ola en ausencia de la corriente y el transporte de la ola por la corriente (durante el cual la ola no se propaga en relación con la corriente).

Si el campo de corriente no es uniforme, induce un cambio en la dirección, lo que produce la refracción de la ola. La corriente mueve las partículas de agua y, por lo tanto, las líneas de isofase (cresta de la ola), en la dirección de la corriente (Figura **3-1**). Si el campo de corrientes es paralelo a la cresta, la dirección de la ola no cambia. Por el contrario, si tiene un componente normal a la cresta, la dirección de la ola cambia. Específicamente, la variación a lo largo de la cresta de la componente normal de la corriente cambia la dirección de la ola, lo cual induce una refracción inducida por la corriente se debe a la variación a lo largo de la cresta expresada de la siguiente manera $U_n = U \cos \alpha$, donde U es la velocidad a lo largo de la línea de corriente y α es la ángulo entre la dirección de la ola y la dirección de las corrientes (Figura **3-1**).

Para determinar la velocidad de giro de la cresta inducida por la variación del campo de corrientes, se considera una eje de referencia a lo largo de la cresta, en el cual está variando U_n (Figura **3-2**). Para deducir la expresión matemática del efecto de las corrientes en la refracción de la ola, se define un sistema local de giro a la izquierda con coordenadas ortogonales (m,n) (las rotaciones en sentido antihorario son positivas), con m a lo largo de línea de cresta (línea isofase) y n a lo largo de una línea normal a la cresta (ola ortogonal), ver Figura **3-2**. La cresta se mueve en la dirección de la línea de corriente, y se considera un punto A que se mueve con la cresta a lo largo de un plano ortogonal. Este punto se mueve durante un intervalo de tiempo Δt una distancia igual a $\Delta n_A = U_n \Delta t$. Durante el mismo periodo de tiempo, un punto B , ubicado a una distancia Δm del punto A donde la magnitud de la componente ortogonal de la corriente es mayor, se desplaza una distancia $\Delta n_B = (U_n + \Delta U_n) \Delta t$. Si la distancia a lo largo de la cresta entre estos puntos A y B es Δm luego el giro direccional de la cresta es $\Delta \theta = -(\Delta n_B - \Delta n_A) / \Delta m = -\Delta U_n \Delta t / \Delta m$. Durante el mismo intervalo de tiempo, la energía viaja con la cresta a lo largo de la línea de corriente con el mismo giro de la dirección de la ola $\Delta \theta$ (asumiendo una cresta localmente recta), entonces la tasa de cambio de la dirección de la ola asociada a su energía es $\Delta \theta / \Delta t = -\Delta U_n / \Delta m$, o, en términos de diferencias infinitesimales (Holthuijsen, 2010):

$$\frac{d\theta}{dt} = C_{\theta,ref} = -\frac{\partial U_n}{\partial m} \quad (3-1)$$

El análisis utilizado para determinar la refracción de la ola debido a la variación de la profundidad a lo largo de la cresta, es similar a la variación que produce el campo de corrientes, teniendo en cuenta, en este caso, la variación espacial de la velocidad de fase C . El cambio de dirección de la cresta θ es $\Delta \theta = -\Delta C \Delta t / \Delta m$, donde la velocidad de fase $C = \sigma / k$, la cual se relaciona con la profundidad, por medio de la relación de dispersión, de la teoría lineal de ondas (ecuación 3-3). La superposición de la refracción inducida por la profundidad y por el campo de corrientes, permite estimar la tasa total del cambio direccional de la ola.

$$C_{\theta,ref,prof+curr} = -\frac{C_g}{C} \frac{\partial C}{\partial m} - \frac{\partial U_n}{\partial m} \quad (3-2)$$

donde $C = \sigma/k$ y $C_g = \partial\omega/\partial k = Cn$. La expresión 3-2 en aguas profundas, donde la variación de la profundidad no tiene un efecto significativo en el comportamiento del oleaje, la tasa de cambio direccional se reduce al segundo término, lo que indica que en aguas profundas el cambio direccional del oleaje depende de la refracción por efecto de la corriente.

Cambio de Frecuencias

Para analizar el efecto del campo de corriente en los cambios de frecuencia del oleaje, se definen tres sistemas de referencia: el primero es un sistema de referencia que se mueve con la corriente, el segundo está fijo al fondo y el tercero se mueve con la energía de la ola o acción de onda. En el cuadro de referencia que se mueve con la corriente, utilizamos la relación de dispersión de la teoría lineal de ondas (ecuación 3-3). En este caso, la frecuencia de la ola es llamado frecuencia relativa, y es denotado como σ .

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3-3)$$

donde g es la gravedad, k el número de onda y d la profundidad. En el sistema de referencia que está fijo al fondo, la frecuencia es llamada absoluta, y se denota como ω , la cual se relaciona con la frecuencia relativa σ , teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes, como:

$$\omega = \sigma + kU_n \quad (3-4)$$

donde U está asociada a la corriente superficial. La diferencia entre σ y ω se deriva directamente del cambio en la dirección de la ola debido a la presencia de la corriente. El término kU_n puede verse como un cambio Doppler, teniendo en cuenta el sistema de referencia fijo del fondo.

En el marco de referencia que se mueve con la energía de la ola, σ evoluciona, dependiendo de las variación espacial de la profundidad y del campo de corrientes. Para determinar la variación temporal de σ , se considera un cambio $\Delta\sigma$ en un intervalo de tiempo t a medida que la ola se propaga en un sistema de coordenadas (n, s) , donde n va en dirección ortogonal a la cresta de la ola y s en dirección de la línea de corriente.

$$\Delta\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial\sigma}{\partial n}\Delta n + \frac{\partial\sigma}{\partial s}\Delta s \quad (3-5)$$

donde Δn es la distancia de propagación, normal a la cresta relativa a la corriente, y Δs es la distancia de propagación, debido al transporte de la energía de la ola a lo largo de una línea de corriente. Usando las ecuaciones 3-4 y 3-5, la definición de la velocidad de grupo $C_g = \partial\sigma/\partial k$, y el hecho de que σ depende de la profundidad, se obtiene

$$\frac{d\sigma}{dt} = C_\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U \frac{\partial d}{\partial s} \right) + C_g \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial\omega}{\partial n} - \frac{\partial(kU_n)}{\partial n} + U \frac{\partial k}{\partial s} \right) \quad (3-6)$$

Para simplificar esta expresión, se tiene en cuenta el concepto de densidad del número de onda, $\partial k/\partial t + \partial \omega/\partial n = 0$. Además, escribiendo el término $U\partial k/\partial s$ en forma diferencial y considerando la irrotacionalidad del campo del vector número de onda, que implica que $\partial k_y/\partial x = \partial k_x/\partial y$ y por lo tanto que el término es cero. Al final se obtiene la siguiente expresión:

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U \frac{\partial d}{\partial s} \right) - C_g k \frac{\partial U}{\partial n} \quad (3-7)$$

Esta ecuación es usada en modelos espectrales para modelar la propagación del oleaje. El término que está por fuera del paréntesis representa la variación de la frecuencia relativa a medida que cambia la profundidad. El primer término dentro del paréntesis representa el efecto de la variación temporal de la profundidad. El segundo término representa el efecto del movimiento de la ola debido a la presencia de la corriente, teniendo en cuenta las variaciones de la profundidad a lo largo de una línea de corriente. El término que está por fuera del paréntesis representa el efecto de la ola que se mueve con una corriente que varía a lo largo de la dirección de propagación. La variación de ω y k se obtienen con σ a partir de la relación de dispersión (ecuación 3-3 y la ecuación 3-4), sin ningún cálculo adicional.

3.2. Modelo de oleaje WAVEWATCH III[®]

En este trabajo se utilizó el modelo de oleaje WAVEWATCH III[®] (WWIII) (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019), en su última versión v6.07. WWIII es un modelo de ondas oceánicas superficiales de tercera generación desarrollado en US National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) basado en el modelo WAM (Komen et al. (1996)). Es una versión mejorada del modelo WAVEWATCH I (WWI) realizado en la Universidad Tecnológica de Delft (Tolman, 1990, 1991) y WAVEWATCH II (WWII), desarrollado por la NASA. WWIII difiere de sus predecesores en las ecuaciones que gobiernan la propagación del oleaje, los métodos numéricos y las parametrizaciones físicas que se utilizan. Las ecuaciones que se presentan a continuación se obtuvieron del manual de WWIII en su última versión v6.07 (WW3DG, 2019).

En el modelo de oleaje (WWIII), la información sobre los parámetros escalares y espectros de energía se obtienen a partir de la densidad de energía $E(\sigma, \theta)$; en función de σ y θ . Modelos como WWIII utilizan la densidad de acción $N(\sigma, \theta)$, que se obtiene al dividir la densidad de energía por ω .

$$N(x, t; \sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3-8)$$

El campo de corrientes afecta la densidad de acción de dos maneras; N se propaga con la celeridad de la onda modificada por la corriente oceánica local, y una segunda forma donde las corrientes oceánicas usan la velocidad y la dirección aparente del viento local para modificar la tensión del viento. La hipótesis implícita en esta ecuación es que las propiedades del medio (profundidad del agua y corrientes) cambian a medida que la onda del campo medio varía en las escalas espaciales y temporales, que son mucho más altas que las escalas de variación de una sola longitud de onda (Tolman, 2002b, 2009).

En el caso de no tener en cuenta el campo de corrientes, la energía de grupo se conserva. Al tener en cuenta el efecto de las corrientes, la energía de una componente espectral ya no se conserva, debido al trabajo realizado por la corriente en la transferencia de momentum medio a las olas (Longuet-Higgins & Stewart, 1961, 1962). Sin embargo N se conserva (Whitham (1965); Bretherton & Garrett (1968)) y por lo tanto es usado en la modelación espectral del oleaje.

El modelo de oleaje (WWIII) resuelve la variación espacial y temporal de N (derivada total), haciéndola proporcional a la razón entre la suma de los términos fuente y sumidero S .

$$\frac{dN}{dt} = \frac{S}{\sigma} \quad (3-9)$$

donde S el efecto neto de los términos fuente y sumidero, y la redistribución de energía entre componentes espectrales de onda.

La ecuación 3-9 representa una forma Euleriana de propagación del oleaje. Esta ecuación puede ser escrita en forma de transporte (con las velocidades fuera de las derivadas), o en forma de conservación (con velocidades dentro de las derivadas). La ecuación que determina la variación de N usada en el modelo WWIII, describe el aumento y disminución, advección y refracción del oleaje debido al efecto que producen las variaciones del campo de corrientes y la profundidad. La ecuación se obtiene expandiendo la derivada material de la ecuación 3-9 en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \quad (3-10)$$

El lado izquierdo de la ecuación representa la parte cinemática; el primer término corresponde a la variación temporal de la acción de la onda, el segundo término representa la advección del espectro en el espacio geográfico bidimensional (x, y) , donde \dot{x} es la velocidad de propagación del espectro en el espacio (C_x, C_y) . Esta velocidad en (x, y) acorde a la teoría lineal de ondas Whitham (1974) está dada por la siguiente expresión:

$$\dot{x} = C_g + U \quad (3-11)$$

donde $C_g = (C_g \cos \theta, C_g \sin \theta)$ es la velocidad de grupo modulada por θ y U es la velocidad superficial media del campo de corrientes. El tercer término representa el efecto de las variaciones espaciales de N teniendo en cuenta la profundidad. El término \dot{k} es la velocidad de propagación del espectro de densidad de acción con respecto a k en un espacio espectral (k, θ) :

$$\dot{k} = - \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \right] \quad (3-12)$$

El primer término de la ecuación 3-12 representa las variaciones de la frecuencia relativa con respecto a s que corresponde a la coordenada espacial en la dirección θ . El segundo término corresponde al efecto del campo de corrientes sobre las olas. El último término del lado izquierdo de la ecuación 3-10, representa la refracción de la onda producida por las variaciones espaciales del campo de corrientes y la profundidad. El término $\dot{\theta}$ es la velocidad de propagación del espectro con respecto a θ en un espacio de coordenadas (k, θ) :

$$\dot{\theta} = - \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (3-13)$$

El efecto de las corrientes sobre la energía de las olas se introduce explícitamente en los términos de propagación mostrados en las ecuaciones 3-10 hasta 3-13. A continuación se explicará en detalle el lado derecho de la ecuación 3-10, donde la variable S representa el efecto neto de los términos fuente y sumidero.

3.3. Términos fuente y sumidero

El modelo de oleaje (WWIII) resuelve la ecuación de propagación de la onda, igualando la derivada material de $N(k, \theta)$, con el efecto neto de los términos fuente y sumidero, dividido por la frecuencia relativa. En aguas profundas, S generalmente se considera que consta de tres partes: un término de interacción atmósfera-oleaje S_{in} , que generalmente es un aporte de energía positivo o negativo, un término de interacciones no lineales ola-ola S_{nl} ; y un término de interacción oleaje-océano, que generalmente está dominado por el efecto del rompimiento de las olas S_{ds} . El término de entrada S_{in} está relacionado con el crecimiento exponencial de la ola del viento, y este término fuente generalmente es el proceso dominante. El término fuente neto, se define como:

$$S = S_{nl} + S_{bot} + S_{in} + S_{ds} \quad (3-14)$$

donde S_{ds} el término de disipación por rotura de las olas (whitecapping) y S_{bot} el efecto por fricción con el fondo.

Las simulaciones numéricas con el modelo de oleaje WAVEWATCH III[®] (WWIII) (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019), fueron realizadas teniendo en cuenta el paquete de términos fuente (ST2) de Tolman & Chalikov (1996) que incluye el cálculo del flujo (FLX3, STAB2). Además, se usó un esquema de propagación de tercer orden (UQ), sin disipación por hielo marino (IC0) y

sin reflexión (REF0). Se usaron los siguientes esquemas en el modelo, teniendo en cuenta el trabajo realizado por Montoya (2013).

- Esquema de propagación de orden superior con la técnica de promediado (PR3) (Tolman, 2002b).
- Interacciones no lineales ola-ola (S_{nl}): aproximación de interacción discreta (DIA) (Hasselmann et al., 1985)
- Interacción atmósfera-oleaje y oleaje-océano ($S_{in}+S_{ds}$): paquete de términos fuente (ST2) de Tolman & Chalikov (1996)
- Interacción por fondo (S_{bot}): fórmula de fricción por fondo (BT1) propuesta por (Hasselmann et al., 1973)
- Entrada lineal (S_{in}): parametrización Cavaleri y Malanotte-Rizzoli con filtro (LN1). (Cavaleri & Rizzoli, 1981)

A continuación se presentan las formulaciones de cada uno de los esquemas mencionados (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019).

3.3.1. Interacción no lineal ola-ola S_{nl}

Las interacciones no lineales ola-ola, permite una redistribución de la energía en el espectro, utilizando el mecanismo de resonancia. En aguas profundas, la evolución del espectro de energía es dominado por la interacción de cuatro ondas llamada cuádrupleta. La energía se puede transferir a frecuencias altas o bajas, produciendo de esta forma disminución de f_p o disipación de la energía por whitecapping, respectivamente. S_{nl} se calcula utilizando la aproximación de interacción discreta (DIA), propuesta por Hasselmann et al. (1985).

Las interacciones no lineales entre cuádrupletas, se analizan por medio del número de onda k_1 a k_4 . En el DIA, se supone que $k_1 = k_2$, así como:

$$\begin{cases} k_1 + k_2 = k_3 + k_4 \\ \sigma_2 = \sigma_1 \\ \sigma_3 = (1 + \lambda_{nl})\sigma_1 \\ \sigma_4 = (1 - \lambda_{nl})\sigma_1 \end{cases} \quad (3-15)$$

donde λ_{nl} es una constante. La contribución S_{nl} a la interacción para cada combinación discreta (f_r, θ) del espectro correspondiente a k_1 se calcula como:

$$\begin{pmatrix} \delta S_{nl,1} \\ \delta S_{nl,3} \\ \delta S_{nl,4} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} C g^{-4} f_{r,1}^{11} \left[E_1^2 \left(\frac{E_3}{(1 + \lambda_{nl})^4} + \frac{E_4}{(1 - \lambda_{nl})^4} \right) - 2 \frac{E_1 E_3 E_4}{(1 - \lambda_{nl}^2)^4} \right] \quad (3-16)$$

donde,

$$\begin{cases} E_1 = E(f_{r1}, \theta_1) & \delta S_{nl,1} = \delta S_{nl}(f_{r,1}, \theta_1) \\ E_2 = E(f_{r2}, \theta_2) & \delta S_{nl,2} = \delta S_{nl}(f_{r,2}, \theta_2) \\ E_3 = E(f_{r3}, \theta_3) & \delta S_{nl,3} = \delta S_{nl}(f_{r,3}, \theta_3) \end{cases} \quad (3-17)$$

Las interacciones no lineales son calculadas considerando un número limitado de combinaciones (λ_{nl}, C) , donde C es una constante de proporcionalidad. En la práctica, solo se utiliza una combinación. En las simulaciones numéricas se tuvo en cuenta los valores de $\lambda_{nl} = 0,25$ y $C = 1,00 \times 10^7$ propuestos por Tolman & Chalikov (1996).

El término S_{nl} fue desarrollado para aguas profundas, usando la relación de dispersión en las condiciones de resonancia. Cuando se considera aguas someras, la expresión es escalada por un factor D . Las ecuaciones para calcular el efecto de las interacciones no lineales en aguas someras, se presentan en el Anexo A.

3.3.2. Interacción atmósfera-oleaje S_{in}

El término que representa el suministro de energía debido al viento S_{in} , es calculado por medio de la formulación de Tolman & Chalikov (1996), la cual consiste en los términos de entrada propuestos por Chalikov & Belevich (1993) y Chalikov (1995), y dos componente de disipación. El término está dado por la siguiente expresión:

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta), \quad (3-18)$$

donde σ es la frecuencia relativa del oleaje y β es un parámetro adimensional de la interacción entre el viento y el oleaje, el cual se aproxima como:

$$10^4 \beta = \begin{cases} -a_1 \sigma_a^2 - a_2 & , & \sigma_a < -1 \\ a_3 \sigma_a (a_4 \sigma_a - a_5) - a_6 & , & -1 \leq \sigma_a < \Omega_1/2 \\ (a_4 \sigma_a - a_5) \sigma_a & , & \Omega_1/2 \leq \sigma_a < \Omega_1 \\ a_7 \sigma_a - a_8 & , & \Omega_1 \leq \sigma_a < \Omega_2 \\ a_9 (\sigma_a - 1)^2 + a_{10} & , & \Omega_2 \leq \sigma_a \end{cases} \quad (3-19)$$

donde,

$$\sigma_a = \frac{\sigma u_\lambda}{g} \cos(\theta - \theta_w) \quad (3-20)$$

es la frecuencia no dimensional de una componente espectral, θ_w es la dirección del viento y u_λ es la velocidad del viento a una altura correspondiente con la longitud de onda aparente (λ_a), la cual se calcula como:

$$\lambda_a = \frac{2\pi}{k |\cos(\theta - \theta_w)|}. \quad (3-21)$$

Los parámetros a_1 hasta a_{10} , Ω_1 y Ω_2 dependen del coeficiente de arrastre C_λ a una altura $z = \lambda_a$. Se toma el viento u_r a una altura de referencia z_r , de modo que u_λ y C_λ deben derivarse como parte de la parametrización. Excluyendo la capa superficial delgada que se ajusta a la superficie del agua, el perfil medio del viento se supone tiene un comportamiento logarítmico.

$$u_z = \frac{v_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (3-22)$$

donde $\kappa = 0,4$ es la constante de von Karman, y z_0 es el parámetro de rugosidad. Según Chalikov (1995) esta ecuación puede reescribirse en términos del coeficiente de arrastre C_r a una altura de referencia z_r , como:

$$C_r = \kappa^2 [R - \ln(C)]^2, \quad (3-23)$$

donde,

$$R = \ln \left(\frac{z_r g}{\chi \sqrt{\alpha} u_r^2} \right), \quad (3-24)$$

donde $\chi = 0.2$ es una constante, y α es el nivel de energía no dimensional en altas frecuencias. La expresiones para determinar el valor del coeficiente de arrastre, y de esta forma estimar los parámetros a_1 hasta a_{10} , Ω_1 y Ω_2 , se presentan en el Anexo B.

3.3.3. Interacción oleaje-océano S_{ds}

El término S_{ds} representa la interacción entre el oleaje y el océano, dominado por el rompimiento de las olas (whitecapping) consta de dos componentes, una componente relacionada con las bajas frecuencias ($S_{ds,l}$) y otra con las altas frecuencias ($S_{ds,h}$).

$$S_{ds}(k, \theta) = S_{ds,l} + S_{ds,h} \quad (3-25)$$

El término $S_{ds,l}$, se basa en una analogía con la disipación de energía debido a la turbulencia.

$$S_{ds,l}(k, \theta) = -2 u_* h k^2 \phi N(k, \theta), \quad (3-26)$$

donde h es una escala de mezcla determinada a partir del contenido de energía del campo de onda en las altas frecuencias.

$$h = 4 \left(\int_0^{2\pi} \int_{f_h}^{\infty} F(f, \theta) df d\theta \right)^{1/2}. \quad (3-27)$$

y ϕ es una función empírica que explica la etapa de desarrollo del campo de onda.

$$\phi = b_0 + b_1 \tilde{f}_{p,i} + b_2 \tilde{f}_{p,i}^{-b_3}. \quad (3-28)$$

La parte lineal de la ecuación 3-28 describe la disipación del oleaje. El término no lineal permite el control sobre las condiciones de crecimiento completo definiendo un valor mínimo para ϕ (ϕ_{min}) para un valor mínimo de $f_{p,i}$ ($f_{p,i,min}$).

El segundo término de la ecuación 3-25 corresponde a la disipación empírica de alta frecuencia y se define como:

$$S_{ds,h}(k, \theta) = -a_0 \left(\frac{u_*}{g} \right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k, \theta) , \quad (3-29)$$

$$B = a_1 \left(\frac{f u_*}{g} \right)^{-a_2} , \quad (3-30)$$

$$\alpha_n = \frac{\sigma^6}{c_g g^2 \alpha_r} \int_0^{2\pi} N(k, \theta) d\theta , \quad (3-31)$$

donde α_n es el nivel de energía de alta frecuencia no dimensional de Phillips normalizado con α_r . a_0 hasta a_2 y α_r son constantes empíricas. Las formulaciones para determinar los parámetros de las ecuaciones 3-28 hasta 3-31 se presentan en el Anexo B.

3.3.4. Término de entrada lineal S_{ln}

S_{ln} es un término de entrada lineal que permite inicializar el modelo y proporcionar un crecimiento del oleaje inicial más adecuado. Se utilizó la parametrización de Cavaleri & Rizzoli (1981), con un filtro para la energía de baja frecuencia de acuerdo con Tolman (1992). El término se puede expresar como:

$$S_{lin}(k, \theta) = 80 \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right)^2 g^{-2} k^{-1} \max[0, u_* \cos(\theta - \theta_w)]^4 G , \quad (3-32)$$

donde ρ_a y ρ_w son las densidades del aire y el agua, respectivamente, y donde G es la función de filtro, definida como:

$$G = \exp \left[- \left(\frac{f}{f_{filt}} \right)^{-4} \right] . \quad (3-33)$$

En Tolman (1992) la frecuencia de filtro f_{filt} es la frecuencia de Pierson-Moskowitz f_{PM} . El filtro puede relacionarse tanto con f_{PM} como con la frecuencia de corte del espectro f_{hf} .

$$f_{filt} = \max[\alpha_{PM} f_{PM}, \alpha_{hf} f_{hf}] , \quad (3-34)$$

donde los valores predeterminados de las constantes α_{PM} y α_{hf} son 1 y 0,5, respectivamente. La dependencia de f_{hf} asegura un comportamiento de crecimiento consistente, sin la posibilidad de que el crecimiento lineal de baja frecuencia domine en recuperaciones extremadamente cortas. S_{ln} hace parte de los términos asociados a la interacción entre la atmósfera y el oleaje.

3.3.5. Interacción por fondo S_{bot}

El término S_{bot} es calculado usando la parametrización lineal de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), tal y como se usa en el modelo WAM (Group, 1988). El término fuente puede ser escrito como:

$$S_{bot}(k, \theta) = 2\Gamma \frac{n - 0,5}{gd} N(k, \theta) \quad (3-35)$$

donde Γ es una constante empírica, la cual es calculada como $\Gamma = -0,038 \text{ m}^2 \text{s}^{-3}$ para oleaje tipo *swell* (Hasselmann et al., 1973), y como $\Gamma = -0,067 \text{ m}^2 \text{s}^{-3}$ para oleaje tipo *wind sea* (Bouws & Komen, 1983), y n es la relación entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo dada por:

$$n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh(2kd)} \quad (3-36)$$

El valor predeterminado en el modelo WWIII para el parámetro es $\Gamma = -0,067$.

3.4. Metodología vientos huracán

Los campos de velocidad de vientos de los huracanes Katrina y Rita, fueron usados como variable de entrada para la simulación numérica. Las bases de datos convencionales (QuikSCAT, NARR, ERAinterim y ERA5) subestiman la magnitud de la velocidad del viento en condiciones extremas de huracán (Chelton & Freilich, 2005; Hennon et al., 2006; Sharma & D'Sa, 2008; Montoya et al., 2013), por lo que se ajustó el campo de vientos, usando el modelo paramétrico HURWIN. Este modelo permite definir un campo de velocidad $V(r)$ a partir de los datos de velocidad máxima de viento (V_{max}) y su radio asociado (R).

3.4.1. Modelo de Huracán HURWIN

El modelo HURWIN permite reconstruir el campo de vientos $V(r)$ para representar la magnitud de la velocidad en condiciones extremas de huracán. HURWIN está basado en el modelo asimétrico de Collins et al. (1971) y Jelesnianski (1974), con mejoras propuestas por Lizano & Omar (1990). Estos autores proponen que la velocidad del viento a una distancia r del centro del huracán está dado por las siguientes expresiones:

$$V(r) = V_{max} \frac{2Rr}{(r^2 + R^2)} \quad r < R \quad (3-37)$$

$$V(r) = V_{max} \frac{V_{max}}{(C_1 r^2)} \log \left(\frac{R}{C_2 r^m} \right) \quad r > R \quad (3-38)$$

donde V_{max} es la velocidad máxima del viento del huracán (m/s), los valores de las constantes son $C_1 = 3,354$, $C_2 = 1,265 \times 10^{-3}$ y $m = 1,575$. R fue obtenido usando el modelo propuesto por Willoughby & Rahn (2004).

$$R = 46,29 e^{0,0153V_{max} + 0,016\phi} \quad (3-39)$$

donde ϕ es la latitud.

3.4.2. Campo de vientos Huracán

Los campo de vientos utilizados en la modelación se obtuvieron usando la metodología propuesta por Montoya (2013), combinando los datos de viento del reanálisis NARR y el modelo paramétrico de vientos de huracán HURWIN. La Figura **3-3** presenta la metodología para el ajuste de los campos de viento, y el caso de aplicación al campo de velocidades del huracán Katrina desarrollado (Montoya et al., 2013).

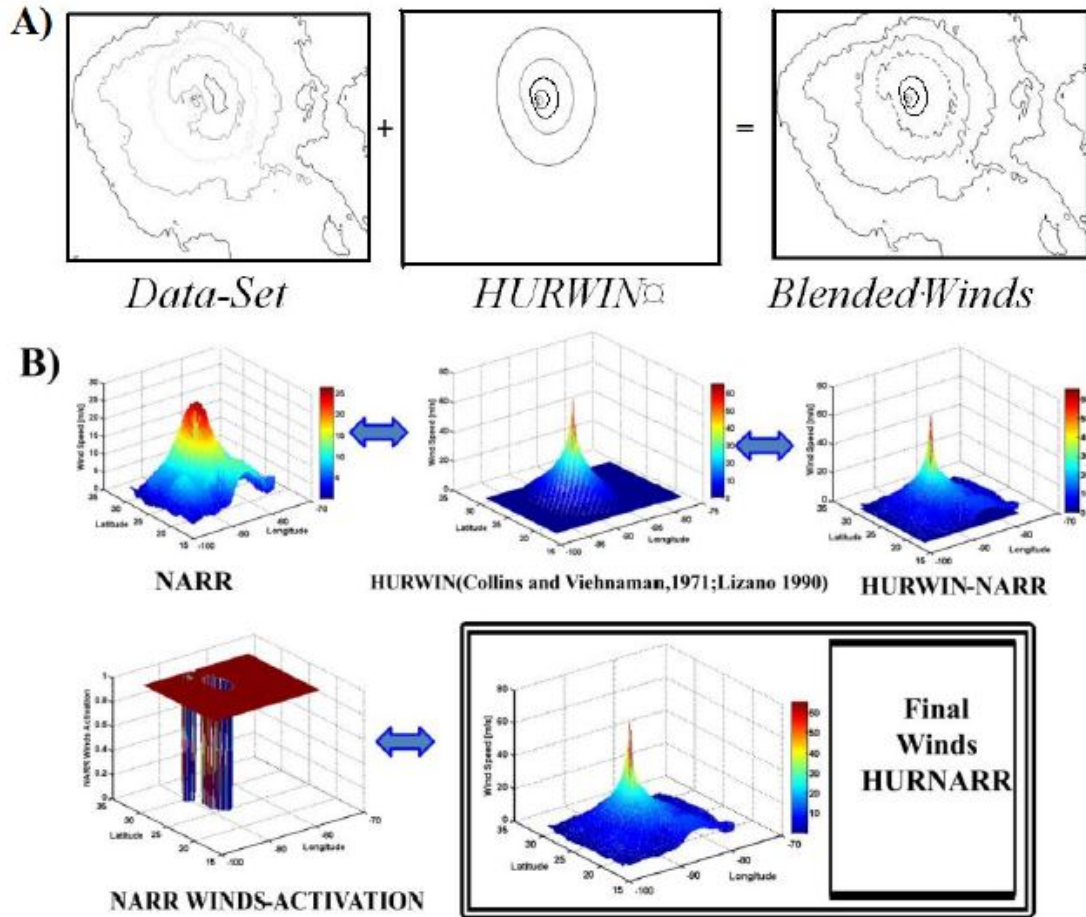


Figura 3-3.: Metodología para la corrección del campo de vientos del huracán Katrina. (A) Esquema de la metodología de vientos combinados de NARR y HURWIN, (B) Caso de aplicación de la metodología: Huracán Katrina. Tomada de Montoya (2013).

Los campos de vientos de los huracanes Katrina y Rita obtenidos con la metodología de vientos combinados HURNARR Montoya et al. (2013) fueron validados usando las series de vientos *in situ* de la NOAA, disponibles en las boyas 42001, 42002, 42007 y 42040. Los resultados obtenidos de la distribución espacial del campo de velocidades fueron comparados con los datos de velocidad de viento de la Hurricane Research Division (HRD). Cabe notar que los datos de HRD con una combinación de todas las observaciones meteorológicas disponibles permiten obtener velocidades de viento más precisas (Powell & Houston (1998); Powell et al. (2003); Powell et al. (2009)).

La Figura 3-4 presenta la comparación de los campos de vientos de las bases de datos NARR, ERA5, los datos combinados HURNARR, y de HRD. Los datos se presentan para el 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina en categoría 5.

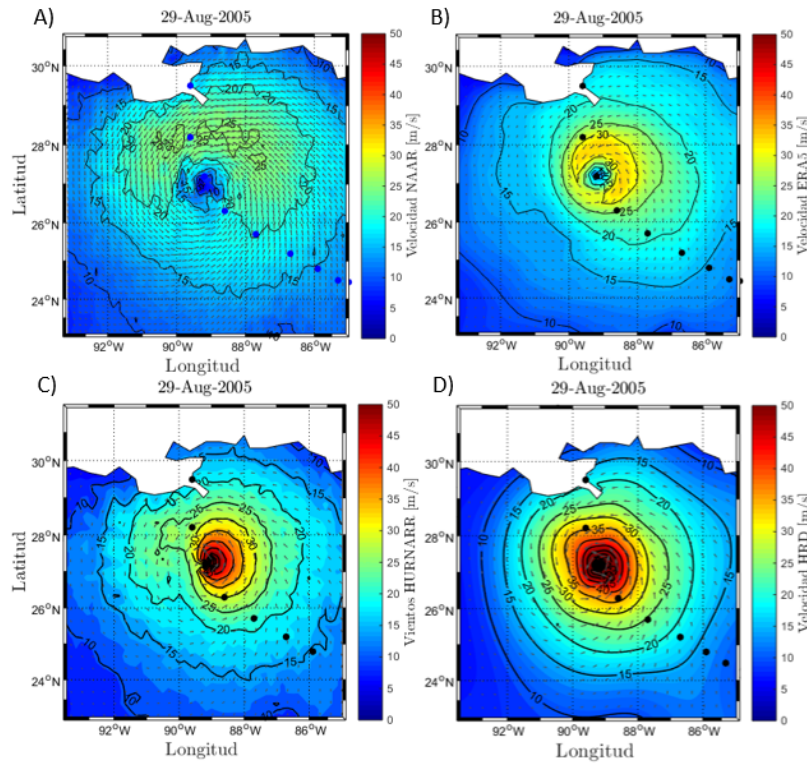


Figura 3-4.: Comparación los campo de vientos de huracán. (A) NARR, (B) ERA5, (C) HURNARR, y (D) HRD. Los datos se presentan para el 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. Los vectores indican la dirección del viento.

En la Figura 3-4, se observa que las bases de datos NARR y ERA5 (Figuras A y B) subestiman la magnitud de las velocidades del campo de vientos de huracán, en comparación con los datos de HRD (Figura D). Cerca al ojo del huracán, estas dos bases de datos, no reproducen la magnitud y el patrón espacial del viento. Los datos de HRD presentan velocidades mayores a 40 m/s cerca del ojo del huracán, mientras que NARR presentan velocidades menores a 20 m/s y ERA5 menores a 35 m/s . A mayor distancia del ojo del huracán, se observa que ERA5 y NARR, presentan una mejor aproximación, en comparación con los datos de HRD. Se observa que las bases de datos presentan un patrón espacial asimétrico, en comparación con los datos de HRD. El campo de vientos de HURNARR presenta valores similares de la magnitud de la velocidad del viento cerca al ojo del huracán. Los vientos de HURNARR son más simétricos, aunque exhiben una reducción más rápida de la magnitud de la velocidad del viento con respecto a la distancia desde el ojo del huracán, en comparación con los datos de HRD.

Los datos de viento de HURNARR tienen una resolución espacial de 18,5 kilómetros ($1/6^\circ$) y una resolución temporal de 6 horas. El periodo de simulación para el huracán Katrina, va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, y para Rita desde 01/09/2005 00:00:00 hasta 15/10/2005 00:00:00.

3.4.3. Evaluación de resultados

La comparación de los parámetros escalares y espectros de energía, calculados con el modelo de oleaje (WWIII) y las mediciones de las boyas de la NOAA, se realizó por medio de diagramas de dispersión (coeficiente de correlación de Pearson (r)), y parámetros estándar como el error cuadrático medio ($RMSE$) y el índice de sesgo $bias$. De manera particular, el coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida de la dependencia lineal entre dos variables aleatorias. Esta correlación es independiente de la escala de las variables, y puede utilizarse siempre y cuando ambas variables sean cuantitativas y continuas. Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta, lo que indica una dependencia total entre las dos variables, cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace; si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva; si $r = 0$, no existe relación lineal; si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa; y si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta, lo que indica que al aumentar una variable, la otra disminuye. La RMSE es la raíz cuadrada del promedio de errores cuadrados. En el caso del error cuadrático medio (RMSE) es siempre positivo, y un valor de 0 indicaría un ajuste perfecto a los datos. En general, un RMSE más bajo es mejor que uno más alto. El efecto de cada error en el RMSE es proporcional al tamaño del error cuadrado; por lo tanto, los errores mayores tienen un mayor efecto. Por lo tanto, la RMSE es sensible a los valores atípicos. En términos del $bias$, un valor negativo indica que los datos están subestimados y un valor positivo que son sobreestimados. Las ecuaciones para estimar los índices estadísticos son las siguientes:

$$r = \frac{N \sum M_i O_i - \sum M_i \sum O_i}{\sqrt{N \sum M_i^2 - (\sum M_i)^2} \sqrt{N \sum O_i^2 - (\sum O_i)^2}}. \quad (3-40)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}}. \quad (3-41)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (3-42)$$

donde N es el número de valores evaluados, M_i son los valores modelados, y O_i son los datos observados.

4. Efecto de la interacción ola-corriente en los parámetros escalares del oleaje en condiciones extremas de Huracán.

4.1. Calibración y validación del modelo de oleaje WAVEWATCH III®

4.1.1. Calibración

La calibración del modelo de oleaje WAVEWATCH III® (WWIII) (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019) se realizó con las mediciones *in situ* de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), obtenidos por las boyas de la NOAA en el Golfo de México. El modelo de oleaje WWIII es calibrado para condiciones extremas de viento durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, usando las mediciones de la boya 42001 ubicada en las coordenadas 25,942° N y 89,657° W. La Figura 4-1 presenta la comparación entre la medición y el cálculo de la serie temporal de la altura de ola significativa (H_s) durante el paso del huracán Katrina. Para el cálculo de la serie de tiempo se utiliza la configuración establecida por defecto al usar el paquete de términos fuente (ST2) de Tolman & Chalikov (1996) en el modelo de oleaje WWIII.

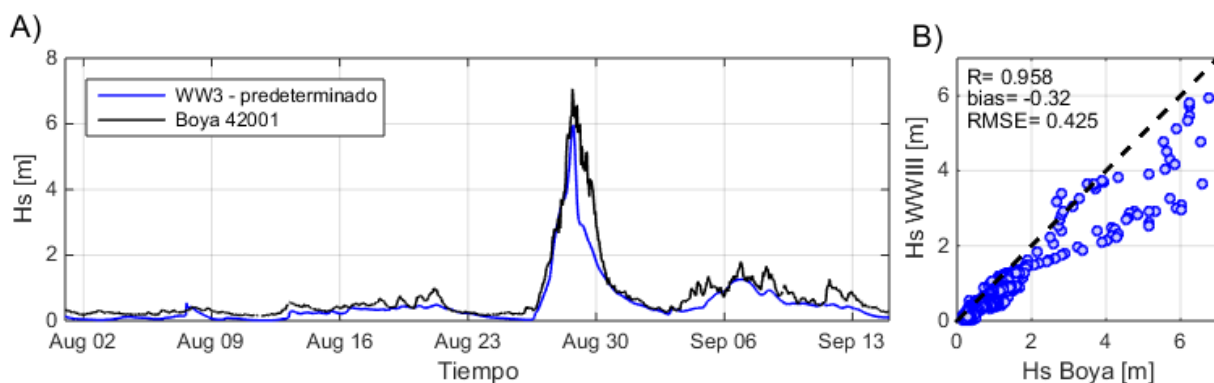


Figura 4-1.: Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) obtenida con la configuración predeterminada del modelo de oleaje WWIII. (A) Comparación de la serie modelada y la serie medida por la boya 42001. (B) Dispersión de puntos de altura de ola significativa (H_s) y valores de los índices estadísticos. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.

La figura muestra que la solución obtenido con la configuración establecida por defecto presenta un buen ajuste para valores menores a 3 m (vientos débiles) y subestimación para valores mayores a 3

m. Por esta razón, es necesario realizar un análisis de sensibilidad de la resoluciones espacial, direccional y temporal, además de calibrar los parámetros del modelo con miras a mejorar la estimación de las variables. Para lograr esto, se realizó un análisis de sensibilidad de la resolución espacial (Δx , Δy) y direccional ($\Delta\theta$) del modelo, en función de la variable de altura de ola significativa (H_s). La Figura 4-2 presenta los resultados obtenidos teniendo en cuenta resoluciones espaciales de 3,5, 7 y 18,5 kilómetros. Los resultados de la solución espacial corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, en las cuales el huracán Katrina alcanza la categoría 5.

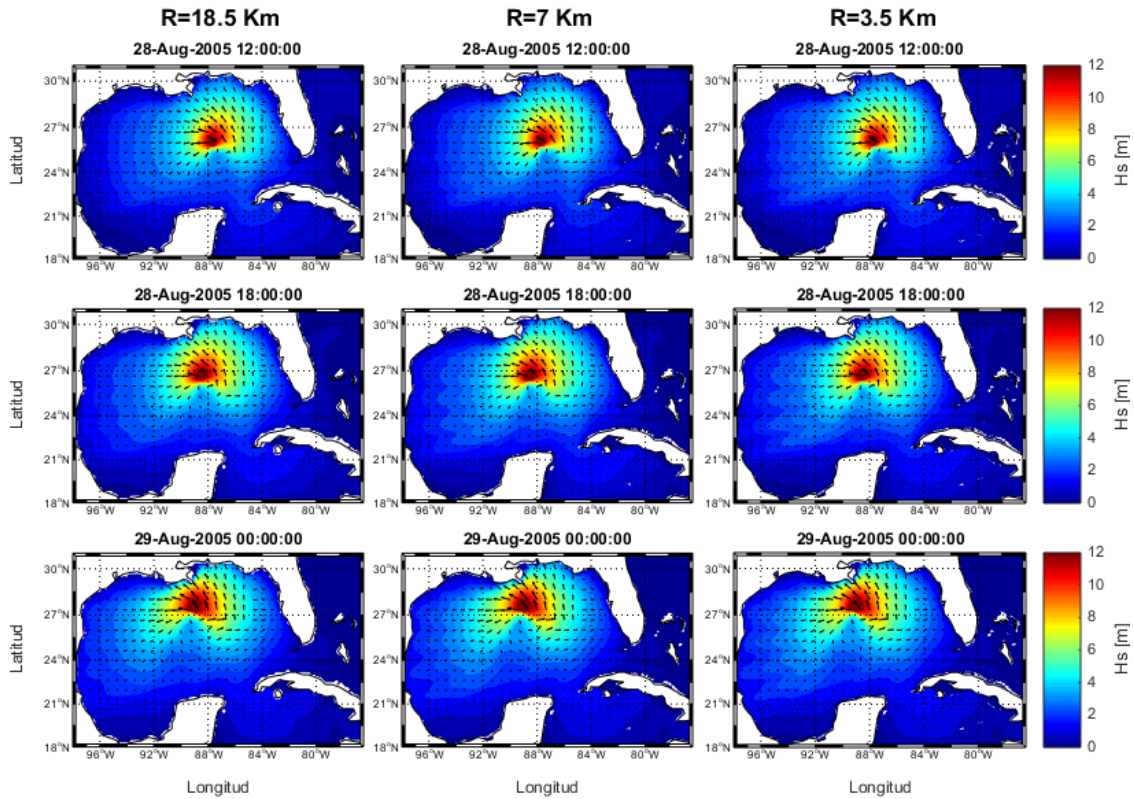


Figura 4-2.: Análisis de sensibilidad de la resolución espacial en la modelación de la altura de ola significativa (H_s). Las soluciones obtenidas tienen en cuenta resoluciones espaciales de 3,5, 7 y 18,5 kilómetros. Las figuras corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. Los vectores indican la dirección del oleaje.

En la Figura 4-2 se observa que el refinamiento de la resolución espacial (Δx y Δy) produce una deformación en la distribución espacial de la altura de ola significativa (H_s), presentando ondulaciones en el patrón espacial de los diferentes contornos de magnitud. En los modelos de oleaje, la desintegración de los campos de oleaje continuos en campos discretos es debido a la resolución espacial y direccional de la malla de solución, conocido como el efecto Garden Sprinkler (GSE) (Booij & Holthuijsen (1987), Tolman (2002b)). Para evitar tal efecto, la resolución espacial con la que se realizan las simulaciones numéricas en condiciones extremas de huracán e interacción ola-corriente se toma como, aproximadamente, 18,5 kilómetros ($1/6^\circ$), evitando que se presenten deformaciones en la solución del patrón espacial de altura de ola significativa (H_s). Al considerar esta resolución,

se obtiene una discretización del dominio de estudio en una cantidad de 133×79 nodos en longitud y latitud, respectivamente, en los cuales se obtiene la solución de la ecuación de propagación del oleaje (ver ecuación 3-10) y así, el resultado de los parámetros escalares (H_s , T_p y θ_p) y espectros de energía del oleaje ($E(f)$, $E(f, \theta)$ y $S(f)$).

La resolución direccional ($\Delta\theta$) del modelo de oleaje WWIII se definió a partir de una análisis de sensibilidad, analizando la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) considerando resoluciones direccionales de 5° , 10° y 20° , y teniendo en cuenta una resolución espacial de 18,5 kilómetros ($1/6^\circ$). La Figura 4-3 presenta la solución obtenida con las simulaciones numéricas del patrón espacial del parámetro de la altura de ola significativa (H_s), variando la resolución direccional en los instantes en que el huracán alcanza la máxima categoría.

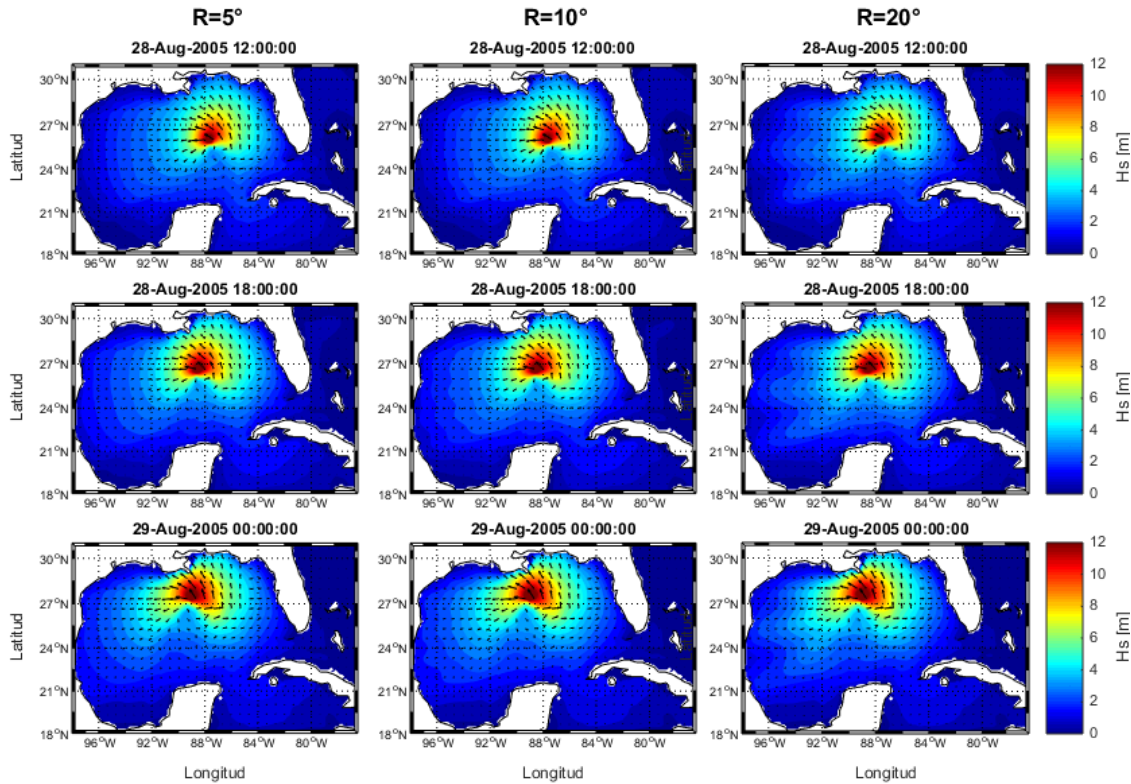


Figura 4-3.: Análisis de sensibilidad de la resolución direccional en la modelación espectral de la altura de ola significativa (H_s). Las soluciones tienen en cuenta resoluciones direccionales de 5° , 10° y 20° grados. Las figuras corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. Los vectores indican la dirección del oleaje.

Al considerar un malla más gruesa en las direcciones se produce una deformación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s), como se muestra en la Figura 4-3. La deformación que se produce presenta ondulaciones en los contornos de igual magnitud, un efecto similar al que se presenta cuando se considera un mayor refinamiento de la resolución espacial. La propagación del oleaje con una resolución direccional gruesa conduce a la desintegración de los campos de oleaje continuos en campos de oleaje discretos (GSE) (Booij & Holthuijsen (1987), Tolman (2002b)). Por lo tanto, la resolución direccional que se tiene en cuenta para realizar las simulaciones de interac-

ción ola-corriente se fija en 5 grados, evitando de esta forma que se presente una distorsión en la solución del patrón espacial de altura de ola significativa (H_s). Luego, para realizar las simulaciones teniendo en cuenta el efecto de las corrientes, y así evaluar los cambios en los parámetros escalares y espectros de energía del oleaje, se consideró una resolución espacial de $\Delta x = \Delta y = 18,5$ kilómetros ($1/6^\circ$) en longitud y latitud, y una resolución direccional de $\Delta \theta = 5$ grados. Similarmente, en el caso del huracán Rita, se realizó un análisis de sensibilidad de la altura de ola significativa (H_s) para determinar la resolución espacial y direccional de las simulaciones numéricas. Los resultados arrojaron la misma resolución espacial de 18,5 kilómetros y una resolución direccional de 5° , en los cuales tampoco se presentan distorsiones GSE en el patrón espacial de altura de ola significativa (H_s).

Las simulaciones se realizaron teniendo en cuenta una discretización espectral de 30 frecuencias, variando desde 0,042 Hz hasta 0,65 Hz, con un factor de incremento de $\sigma_{m+1} = 1,1\sigma_m$. Se consideraron 72 direcciones, lo que equivale a una resolución direccional de 5° . Los pasos de tiempo para el cálculo de la evolución de la energía fueron definidos usando la metodología propuesta por Spindler & Tolman (2007). El paso de tiempo de cálculo espacial Δt_{xy} se estimó cumpliendo el criterio de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), el cual establece que la relación entre la velocidad de grupo (C_g) más alta del rango de frecuencias multiplicada por el paso de tiempo, dividido por el tamaño de la celda (resolución espacial) debe ser menor o igual a uno (1). Se usó la siguiente expresión para estimar el paso de tiempo espacial Δt_{xy} (Spindler & Tolman, 2007).

$$\Delta t_{xy} \leq \frac{\Delta x}{C_g} = 123,766 \Delta x * \cos(\text{máx}(lat)) f \quad (4-1)$$

donde f es la frecuencia mínima que se definió para realizar las simulaciones, y $\text{máx}(lat)$ es el valor de la máxima latitud en grados. Luego de establecer el paso de tiempo espacial (Δt_{xy}), se realizó la estimación del paso del tiempo global del modelo (Δt_g), el cual usualmente es estimado como 2 o 3 veces el paso de tiempo de cálculo espacial (Spindler & Tolman, 2007). Una vez determinado el paso de tiempo global (Δt_g), el paso de tiempo de cálculo direccional Δt_k se estableció como $0,5\Delta t_g$. Finalmente, el paso de tiempo que se definió para los términos fuente Δt_s fue de 3 segundos, para tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral. Teniendo en cuenta la formulaciones de Spindler & Tolman (2007) para el cálculo de los pasos de tiempo y el análisis realizado por Montoya (2013) en condiciones de interacción ola-corriente, fueron definidos los siguientes valores: paso de tiempo global de 240 segundos, paso de tiempo espacial de 60 segundos, paso de tiempo de cálculo direccional de 25 segundos y un paso de tiempo para la integración de los términos fuente de 3 segundos.

Una vez definidos los pasos de tiempo del modelo, la resolución espacial y la resolución direccional, se calibraron los parámetros ajustables en los términos fuente y sumidero del modelo de oleaje WWIII. Las simulaciones se realizaron teniendo en cuenta la parametrización de Tolman & Chalikov (1996). Además, en el estudio desarrollado por Montoya (2013) se realizó un análisis de sensibilidad de la parametrización de Tolman & Chalikov (1996), cuyos resultados y parámetros se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1.: Parámetros empleados en el análisis de sensibilidad para las simulaciones con el modelo de oleaje (WWIII).
Modificado de Montoya (2013)

Parámetro/Nombre	Concepto	Valor	Descripción
C_o (STABSH)	Energía de entrada desde la atmósfera (viento) al campo de formación del oleaje	1.1	Velocidad de viento efectiva propuesta por Tolman (2002b) en respuesta a los problemas relacionados con el crecimiento del oleaje en aguas profundas y los efectos de estabilidad en la tasa de crecimiento del oleaje.
λ (LAMBDA)	Interacciones no lineales	0.25	Constante en las ecuaciones de condiciones de resonancia y en la contribución de S_{nl} a la interacción para cada combinación discreta (f, θ) . Ecuación 3-16.
γ (GAMMA)	Fricción por fondo	0.038	Constante empírica para estimar la fricción por fondo.
X_s (SWELLF)	Energía de entrada desde la atmósfera (viento) al campo de formación del oleaje	0.1	Factor de reducción para la disipación del oleaje debido a vientos opuesto o débiles en el término S_{in} .
C (NLPROP)	Interacciones no lineales	1E+07	Constante de proporcionalidad en la estimación de la contribución de S_{nl} a la interacción para cada combinación discreta (f, θ) . Ecuación 3-16.
K_d (KD CONV)	Interacciones no lineales	0.75	Profundidad relativa media empleada en la estimación del factor D, para tener en cuenta el efecto de las aguas someras en el término de interacción ola-ola δS_{nl} . Ecuación 3-16.
X_p , X_r y X_f	Integración numérica de los términos fuente	0.15, 0.1 y 0.05	Parámetros en los esquemas de integración de los términos fuente.
C_λ	Coefficiente de arrastre	0.0035	Parámetro empleado para estimar las constantes que definen la magnitud de β en la ecuación 3-19, usado para estimar la energía asociada a la interacción del viento y el oleaje (σ_a) en la ecuación 3-18.

En el trabajo realizado por Montoya (2013), se concluyó que los parámetros más sensibles en la formulación propuesta por Tolman & Chalikov (1996), para ingresar la energía del viento como forzador al modelo, son los parámetros STABSH (C_o) y LAMBDA (λ), siendo el parámetro STABSH(C_o) más sensible con respecto al parámetro LAMBDA (λ). Por lo tanto, para realizar la calibración en condiciones extremas de huracán del modelo de oleaje WWIII se varía el parámetro STABSH y se trabaja con un valor λ constante, establecido por defecto. Se usa un valor limitado del coeficiente de arrastre (C_λ) en la estimación de la energía debido a la interacción de la atmósfera con el oleaje.

Para seleccionar el valor óptimo del parámetro STABSH (C_o), relacionado con la energía de entrada desde la atmósfera al campo de formación del oleaje (S_{in}), se realizó un conjunto de simulaciones con el modelo de oleaje WWIII. El análisis de sensibilidad del coeficiente de calibración STABSH se realizó para ambos casos de estudio; es decir, se obtuvo un valor óptimo del coeficiente para las simulaciones correspondientes al paso de los huracanes Rita y Katrina. Las simulaciones numéricas fueron realizadas variando el parámetro STABSH entre 1 y 2. Los resultados obtenidos con la modelación espectral fueron comparados con la información disponible de las mediciones de la boya 42001 ubicada en el Golfo de México en las coordenadas 25,942° N y 89,657° W. Las Figuras 4-4 y 4-5 presentan los resultados obtenidos con la modelación espectral de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), respectivamente. Las series temporales se presentan para el periodo de simulación que corresponde al paso del huracán Katrina.

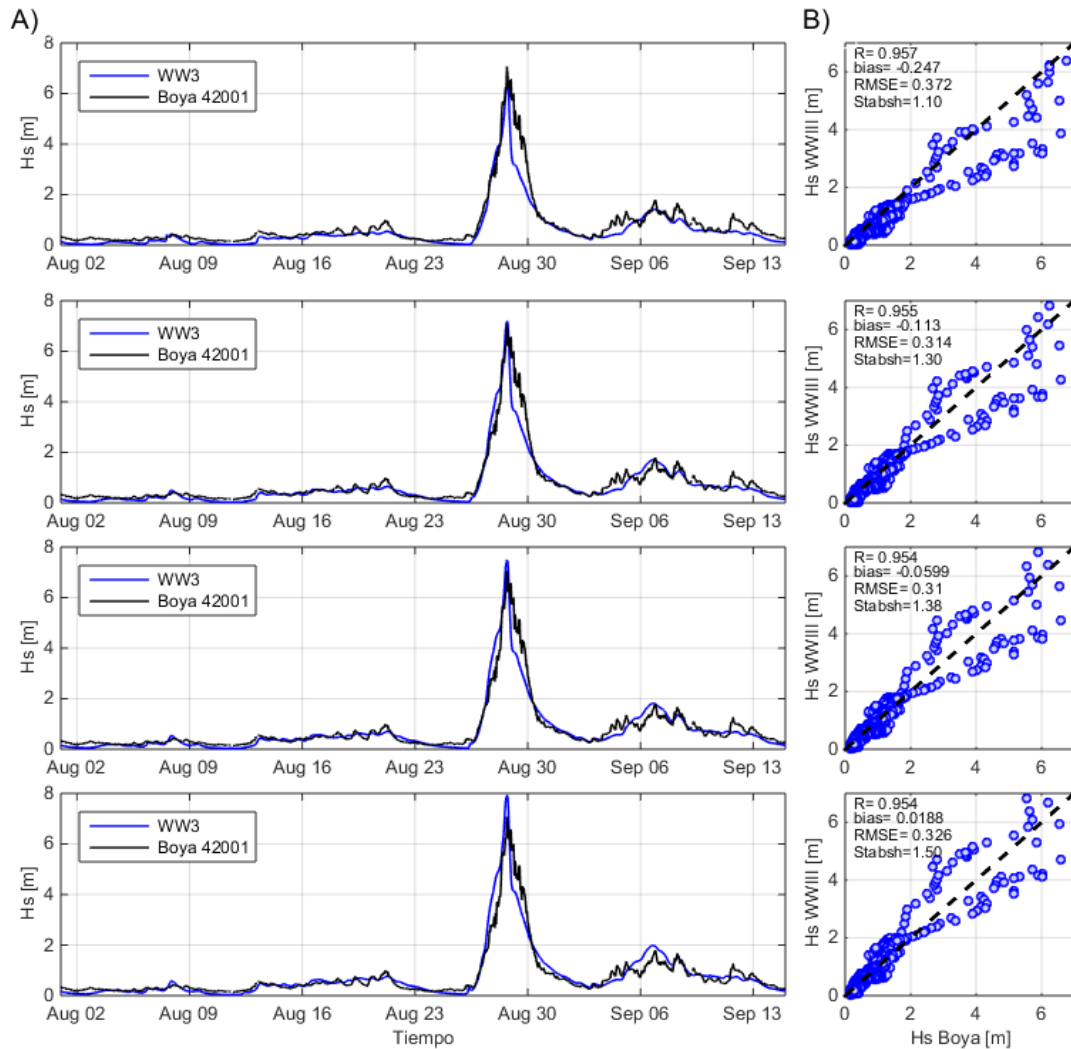


Figura 4-4.: Análisis de sensibilidad del coeficiente de calibración STABSH en la modelación de la altura de ola significativa (H_s). (A) Comparación entre las series temporales de altura de ola significativa (H_s) modeladas y las series medidas por la boya 42001 para valores STABSH $C_o = 1,10, 1,30, 1,38, 1,50$ (de arriba hacia abajo). (B) Dispersión de puntos de las series modeladas e índices estadísticos. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.

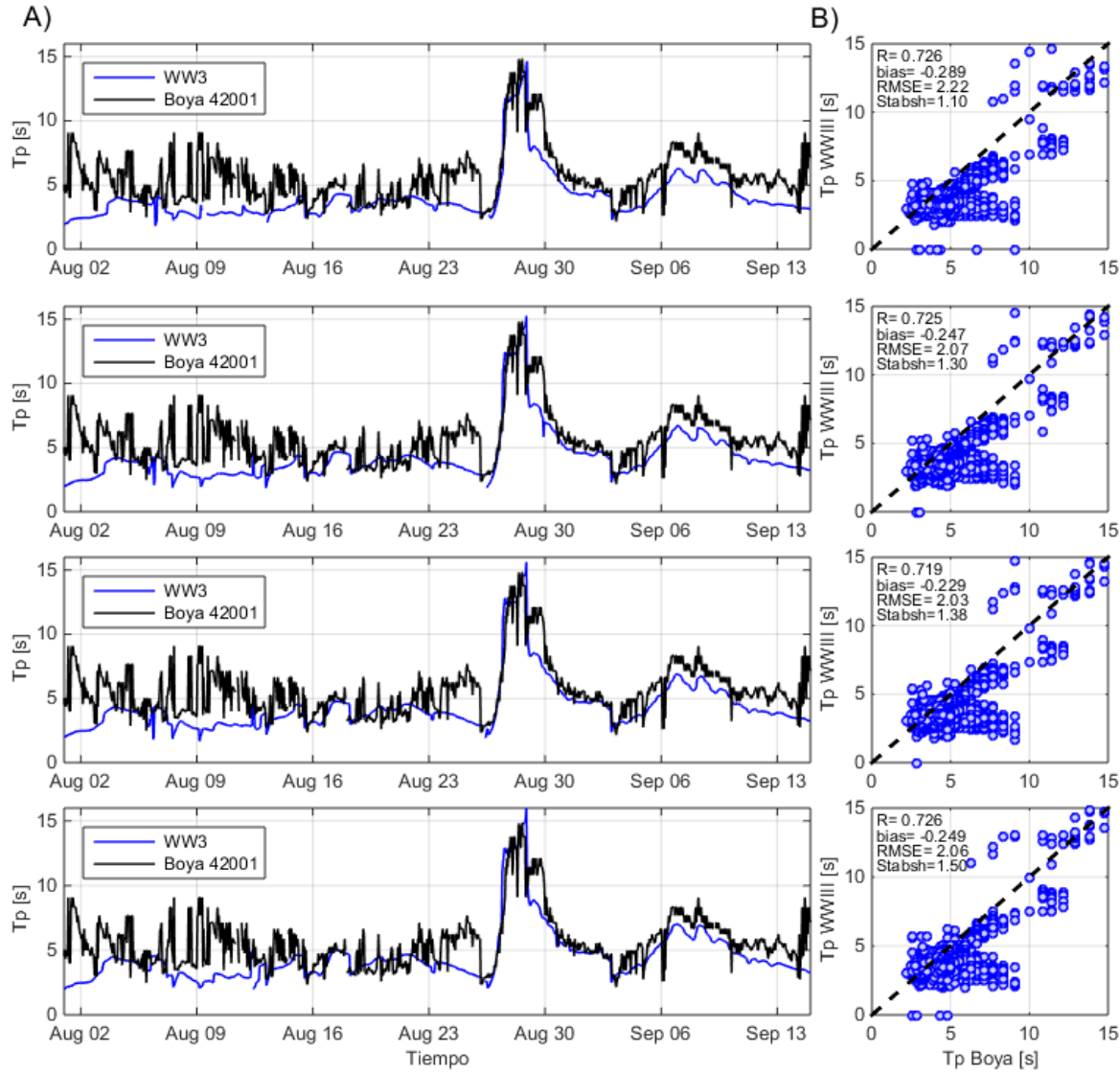


Figura 4-5.: Análisis de sensibilidad del coeficiente de calibración STABSH en la modelación del periodo pico (T_p). (A) Comparación entre las series temporales de periodo pico (T_p) modeladas y las series medidas por la boy 42001 para valores STABSH $C_o = 1,10, 1,30, 1,38, 1,50$ (de arriba hacia abajo). (B) Dispersión de puntos de las series modeladas e índices estadísticos. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.

De las Figuras 4-4 y 4-5 se observa que la simulación que considera un valor del coeficiente de calibración STABSH $C_o = 1,380$, se ajusta mejor a las mediciones de la boy 42001 de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), basado en el error cuadrático medio (RMSE). En el caso de la altura de ola significativa (H_s), al considerar este valor del parámetro de calibración se obtiene un valor del error cuadrático medio (RMSE) de 0,31 metros de altura de ola significativa (H_s), un coeficiente de correlación de 0,954 y un valor del *bias* de $-0,0599$. Lo que indica que la serie temporal de altura de ola significativa (H_s) se ajusta a las mediciones realizadas por la boy 42001, presentando una correlación positiva, con una tendencia a subestimar la magnitud del parámetro. En el caso del periodo pico (T_p), para un valor de $C_o = 1,380$, se obtiene un RMSE

de 2,03 segundos de periodo pico (T_p), un coeficiente de correlación de 0,719 y un valor del *bias* de $-0,229$. Lo que indica que hay una correlación positiva y una tendencia a subestimar la magnitud de T_p .

La Figura 4-6 presenta el comportamiento del error cuadrático medio (RMSE) de la altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), que se obtiene al variar el parámetro de calibración STABSH (C_0), durante el paso de los huracanes Katrina y Rita. Las simulaciones se realizaron teniendo en cuenta un periodo de condiciones débiles de viento antes y después del paso de los huracanes. En el caso del huracán Katrina, el periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00 y el periodo de huracán va desde 23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00; y en el caso del huracán Rita, el periodo de simulación va desde 01/09/2005 00:00:00 hasta 15/10/2005 00:00:00 y el periodo de huracán va desde 18/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00. El valor del error cuadrático medio de la altura de ola significativa (H_s) se obtuvo comparando las series modeladas y las series medidas por la boya 42001.

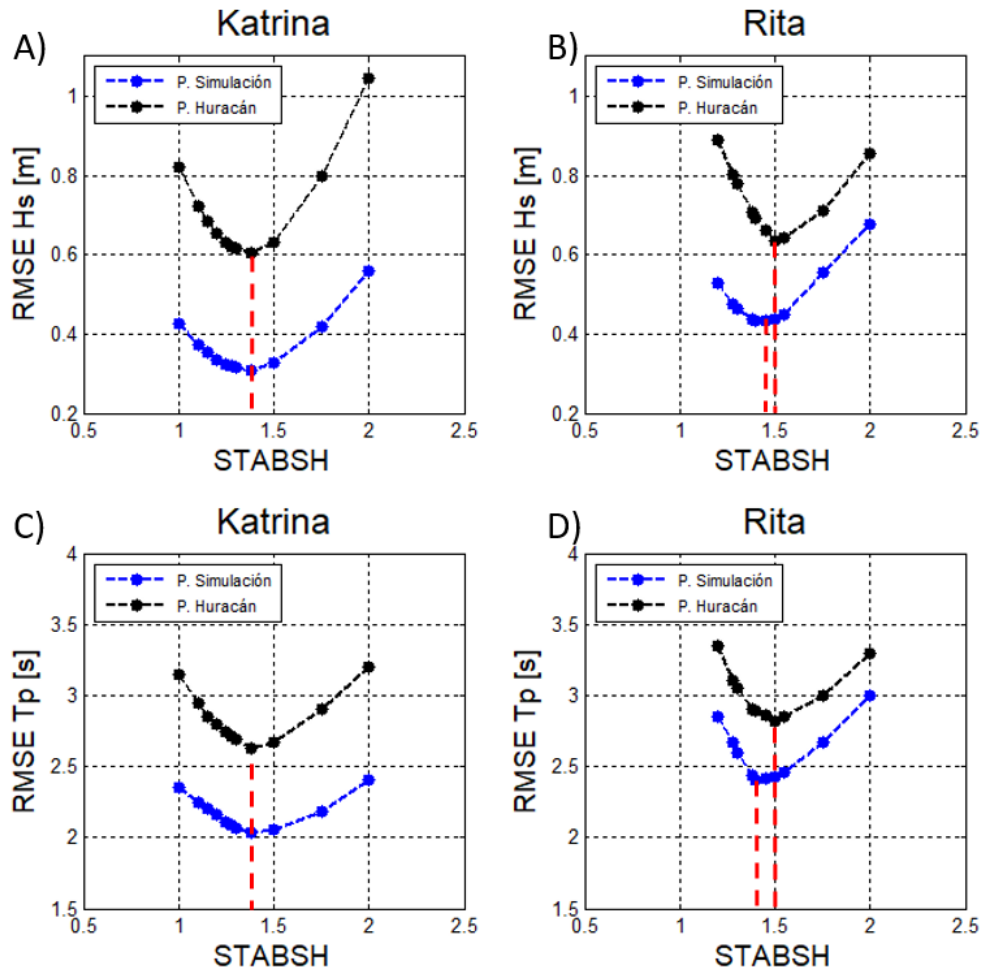


Figura 4-6.: Optimización del parámetro STABSH (C_0) con el error cuadrático medio (RMSE). RMSE de la altura de ola significativa (H_s) durante el huracán (A) Katrina y (B) Rita. RMSE del periodo pico (T_p) durante huracán (C) Katrina y (D) Rita.

De la Figura 4-6, se observa que para los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), el valor óptimo del parámetro de calibración STABSH (C_o) en el caso del huracán Katrina es 1,38, tanto para el periodo de simulación 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, que incluye las condiciones débiles de viento, como para el periodo que solo tiene en cuenta las condiciones extremas de viento de huracán, desde 23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00. En el caso del huracán Rita, se obtiene que los valores óptimos para el periodo de simulación son 1,45 (01/09/2005 00:00:00 hasta 15/10/2005 00:00:00) para la altura de ola significativa (H_s), y 1,40 para el periodo pico (T_p), mientras que para el periodo de huracán es 1,50. Para ambos parámetros escalares, por lo tanto, se usa un valor de STABSH de 1,50, ya que permite obtener una mejor estimación durante el periodo que corresponde a condiciones extremas de viento del huracán Rita (18/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00).

4.1.2. Validación

La validación de la configuración y calibración del modelo, durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, se realizó usando la información disponible de las series temporales de los parámetros escalares H_s y T_p , de la boya 42039 ubicada en las coordenadas $86,008^\circ$ W y $28,788^\circ$ N. El periodo de simulación va desde 01/08/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. La Figura 4-7 presenta los resultados obtenidos con el modelo calibrado durante el paso del huracán Katrina, y las comparaciones con las mediciones de las boya 42039.

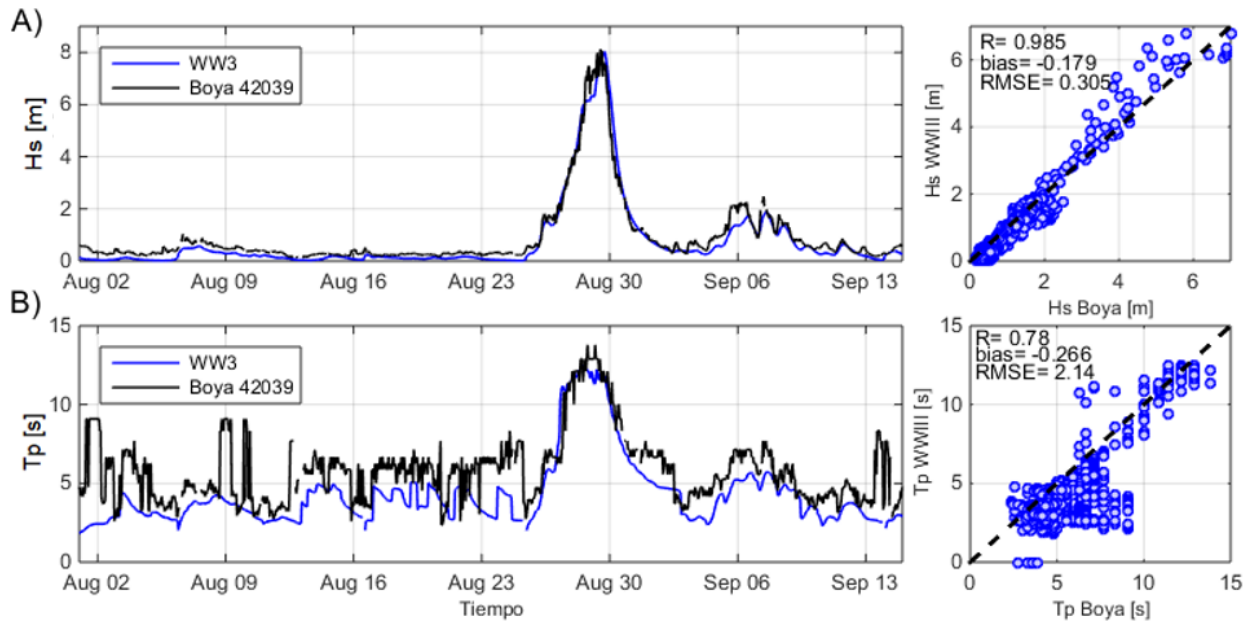


Figura 4-7.: Validación de la calibración del modelo de oleaje WWIII, durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de la serie temporal de altura de ola significativa (H_s) con los datos medidos por la boya 42039, y dispersión de puntos con los valores de los índices estadísticos. (B) Comparación de la serie temporal de periodo pico (T_p), dispersión de puntos e índices estadísticos.

Similarmente, la Figura 4-8 presenta los resultados obtenidos de las series temporales de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), durante el paso del huracán Rita, en comparación con las mediciones de las boya 42039.

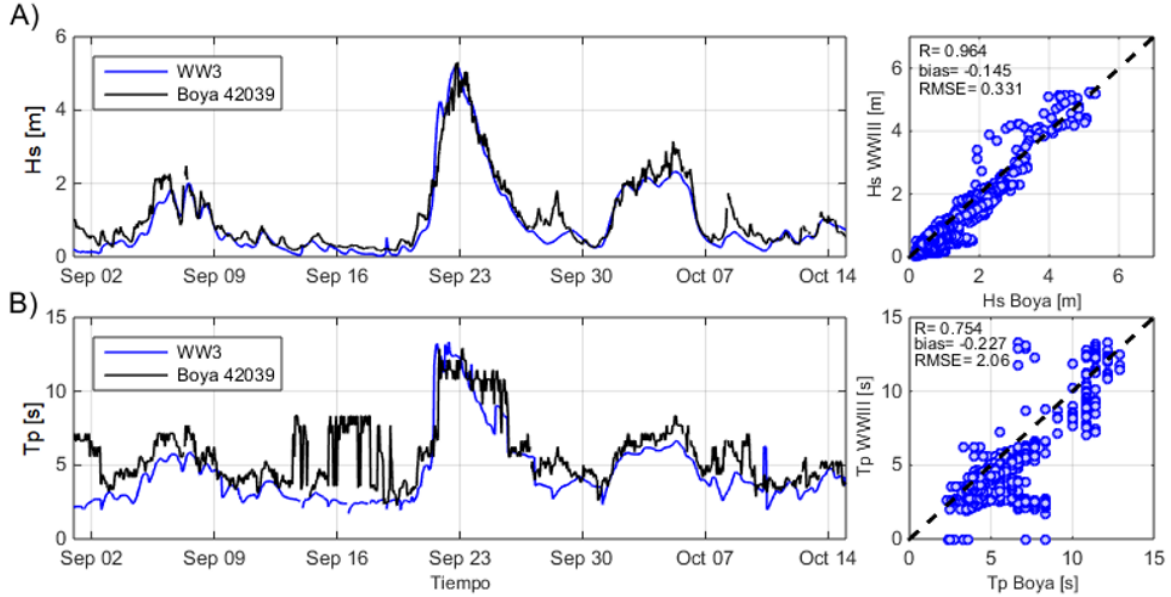


Figura 4-8.: Validación de la calibración del modelo de oleaje WWIII, durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de la serie temporal de altura de ola significativa (H_s) con los datos medidos por la boya 42039, y dispersión de puntos con los valores de los índices estadísticos. (B) Comparación de la serie temporal de periodo pico (T_p), dispersión de puntos con e índices estadísticos.

El modelo representa adecuadamente la variabilidad y la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), en condiciones débiles y extremas de viento para ambos huracanes. Tal como se demostró para el caso del huracán Katrina en las Figuras 4-4 y 4-5, el modelo predice las series temporales de H_s y T_p con una correlación positiva y tendencia a subestimar las medidas. En el caso del huracán Rita, que no fue presentado en detalle por simplicidad, se obtuvo un valor del RMSE de 0,331 metros de altura de ola significativa (H_s), un coeficiente de correlación de 0,964 y un valor del *bias* de $-0,145$, lo que indica que la serie temporal de altura de ola significativa (H_s) se ajusta a las mediciones, presentando una correlación positiva. La estimación del periodo pico (T_p), presenta un RMSE de 2,06 segundos de periodo pico (T_p), un coeficiente de correlación de 0,754 y un valor del *bias* de $-0,227$. Lo que indica que hay una correlación positiva. En el case del huracán Rita, al igual que para Katrina, hay una tendencia a subestimar la magnitud de los parámetros H_s y T_p .

Se concluye de esta sección que el modelo representa adecuadamente los parámetros escalares, teniendo en cuenta la calibración y configuración establecida a partir del análisis de sensibilidad de la resolución espacial y direccional, la estimación de los pasos de tiempo y la calibración de los parámetros del modelo. Adicionalmente, los resultados obtenidos con el modelo calibrado de los parámetros escalares del oleaje, son validados con las mediciones de las boyas 42002, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA, estos resultados se presentan en la sección 4.2.

Con la configuración y calibración del modelo definida a partir del análisis de sensibilidad realizado, empleando la metodología propuesta por Montoya (2013), se estudiará el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje durante condiciones extremas de viento de huracán. En particular, en la sección 4.2, se analiza el efecto de las corrientes superficiales de AVISO en el comportamiento espacial y temporal de los parámetros escalares (H_s , T_p , Dir), y en el Capítulo 5, se emplea esta configuración para estudiar los términos fuente ($S(f)$) y espectros de energía del oleaje ($E(f)$, $E(f, \theta)$). La Tabla **C-1** (ver anexo C) presenta un resumen con los principales parámetros empleados en la configuración y calibración del modelo de oleaje WWIII.

4.2. Series temporales de los parámetros escalares del oleaje: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (θ_p).

Una vez establecida la configuración y calibración del modelo de oleaje WWIII (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019), se presentan los resultados de la modelación espectral del oleaje teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. El análisis de los parámetros escalares (H_s , T_p , y θ_p) y espectros de energía del oleaje ($E(f)$, $E(f, \theta)$ y $S(f)$) durante condiciones extremas de viento de huracán, se realizó teniendo en cuenta el campo de corrientes superficiales de los datos de información satelital de AVISO. La resolución temporal de los datos de corrientes es de un día, y la resolución espacial es de aproximadamente 27,5 kilómetros ($1/4^\circ$). Las simulaciones se realizaron teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad realizado en la calibración del modelo (4.1), donde se definió una resolución espacial de 18,5 kilómetros ($1/6^\circ$) y una resolución direccional de 5° grados.

Los resultados obtenidos con la modelación de las series temporales de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (θ_p), fueron comparados con las mediciones de las boyas de la NOAA, ubicadas en el Golfo de México. Las boyas fueron seleccionadas teniendo en cuenta la disponibilidad de datos de las series temporales de los parámetros escalares del oleaje durante el periodo de huracán. Dado que el paso de eventos extremos generan dificultades para realizar las mediciones, algunas boyas no presentan datos durante los periodos que corresponden al paso de los huracanes Katrina y Rita; además, se tuvo en cuenta la distancia de la boya a la trayectoria de los huracanes. La Figura 4-9 presenta la trayectoria de los huracanes Katrina y Rita, indicando la categoría, según la escala de vientos de huracán de Saffir-Simpson, además se presenta la ubicación de las boyas seleccionadas (punto verde y contorno negro) para validar los resultados obtenidos con el modelo WWIII.

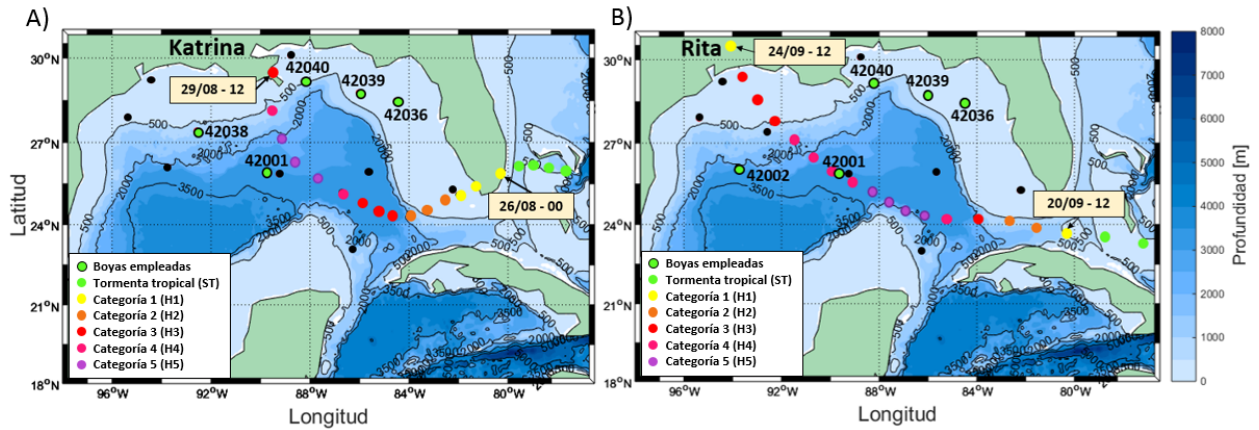


Figura 4-9.: Trayectoria de los huracanes Katrina y Rita, y ubicación de las boyas seleccionadas para validar los resultados obtenidos con la modelación espectral de los parámetros escalares del oleaje. Los colores representan la categoría del huracán de la siguiente forma: Tormenta tropical (ST-Verde), Huracán categoría 1 (H1-Amarillo), categoría 2 (H2-Naranja), categoría 3 (H3-Rojo), categoría 4 (H4-Rosado), y categoría 5 (H5-Morado). Las fechas corresponden al periodo 28/08/2005 00:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, en el caso del huracán Katrina, y al periodo 20/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, en el caso del huracán Rita.

4.2.1. Huracán Katrina

La Figura 4-10 presenta los resultados de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) calculadas con el modelo de oleaje WWIII incluyendo el efecto de las corrientes superficiales de AVISO. Los resultados son comparados con los resultados obtenidos de las simulaciones que no tienen en cuenta el efecto de las corrientes, y con los datos medidos por las boyas de la NOAA presentadas en la Figura 4-9 durante el paso del huracán Katrina.

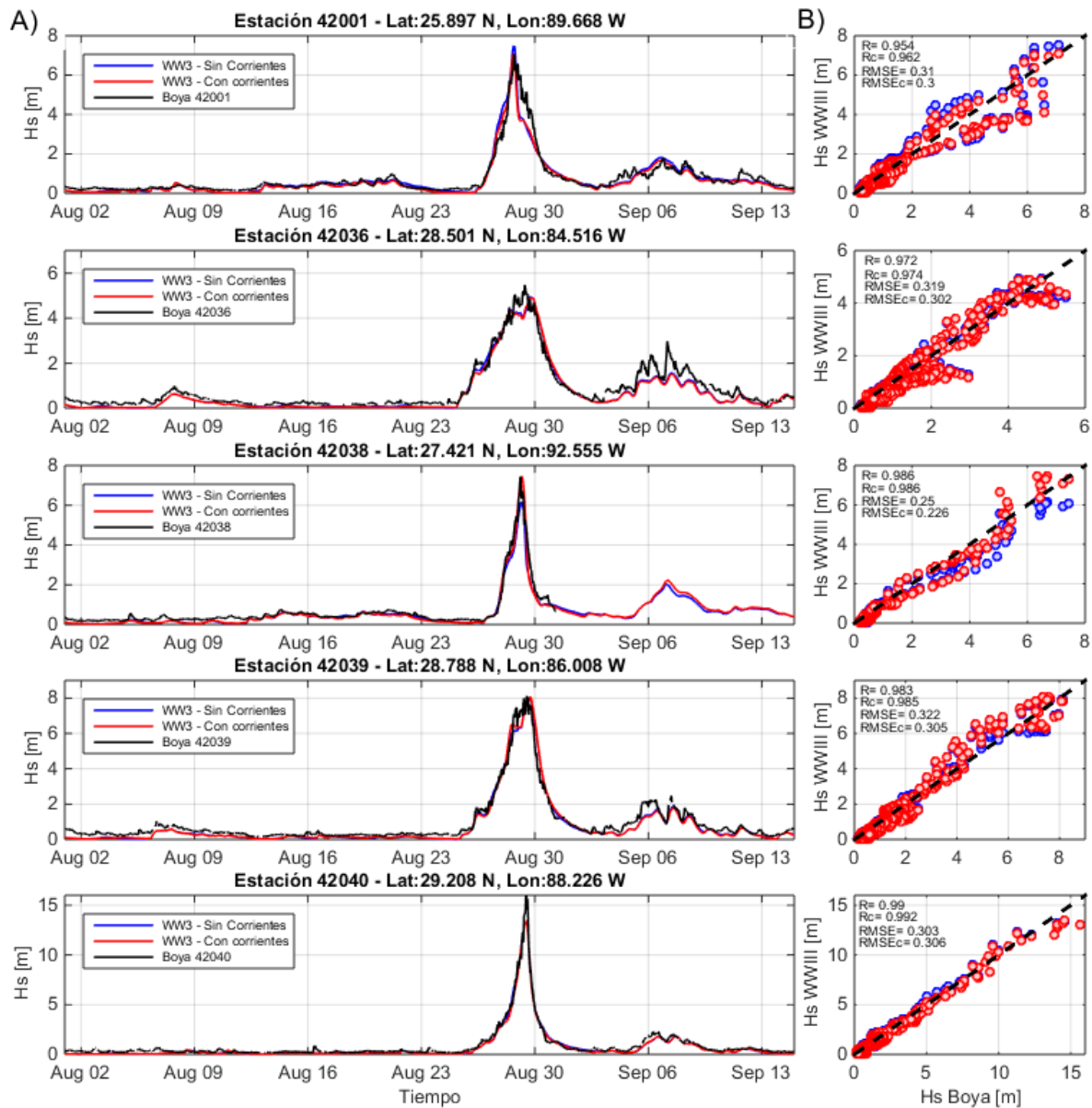


Figura 4-10.: Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s), durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de las series temporales de H_s calculadas con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas y valores de los índices estadísticos.

La Figura 4-11 presenta las series temporales de periodo pico (T_p) obtenidas con las simulaciones del modelo de oleaje WWIII incluyendo el efecto de las corrientes superficiales de AVISO. Las series son comparadas con los resultados obtenidos de las simulaciones que no incluyen el efecto de las corrientes, y con los datos medidos por las boyas de la NOAA presentadas en la Figura 4-9 durante el paso del huracán Katrina.

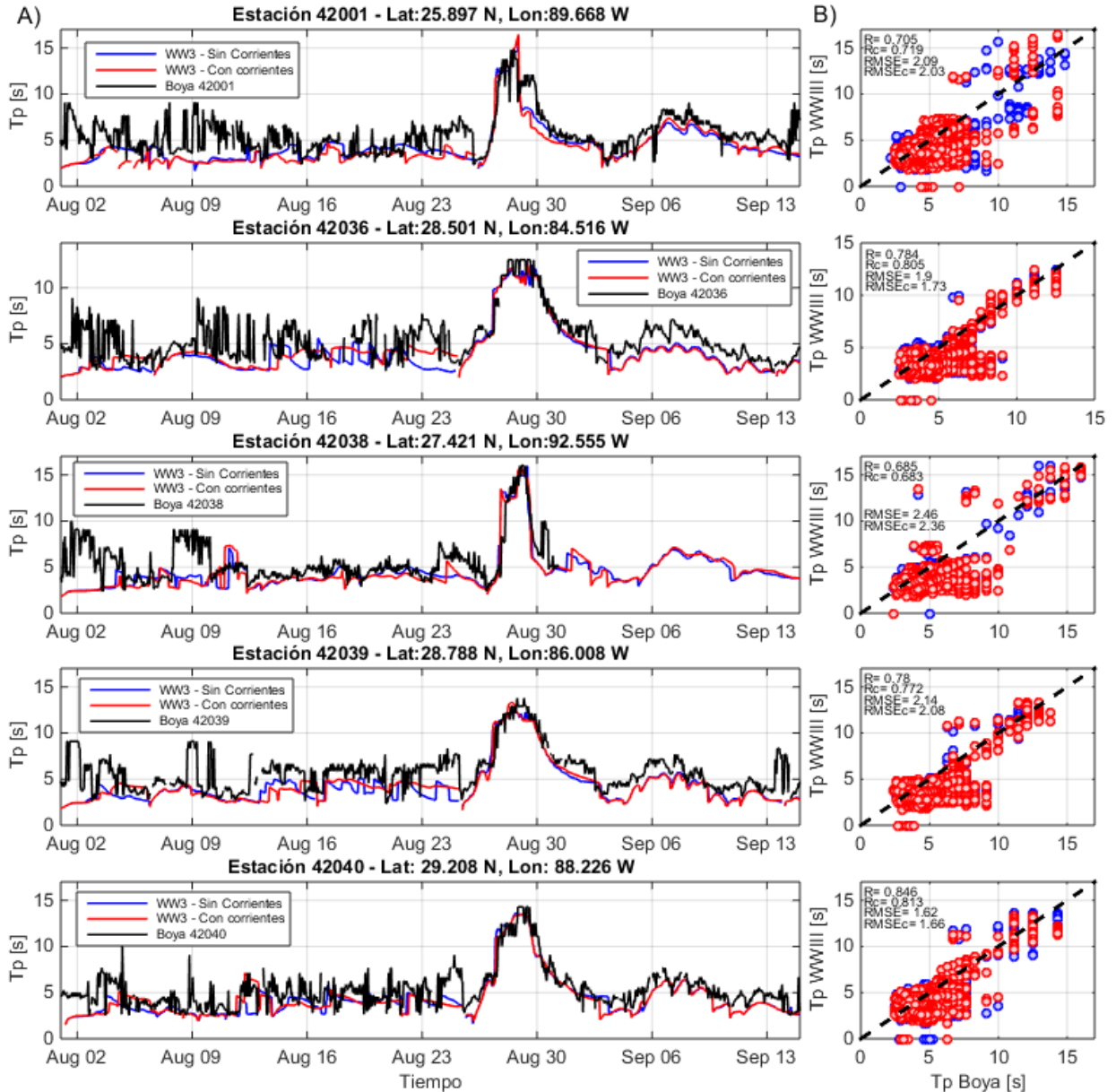


Figura 4-11.: Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de periodo pico (T_p), durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de las series temporales de T_p calculado con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de periodo pico (T_p) y el valor de los índices estadísticos.

La Figura 4-12 presenta las series temporales de la dirección pico del oleaje (θ_p) obtenidas con las simulaciones del modelo de oleaje WWIII con y sin corrientes. Los resultados son comparados con los datos medidos por las boyas de la NOAA presentadas en la Figura 4-9 para el paso del huracán Katrina.

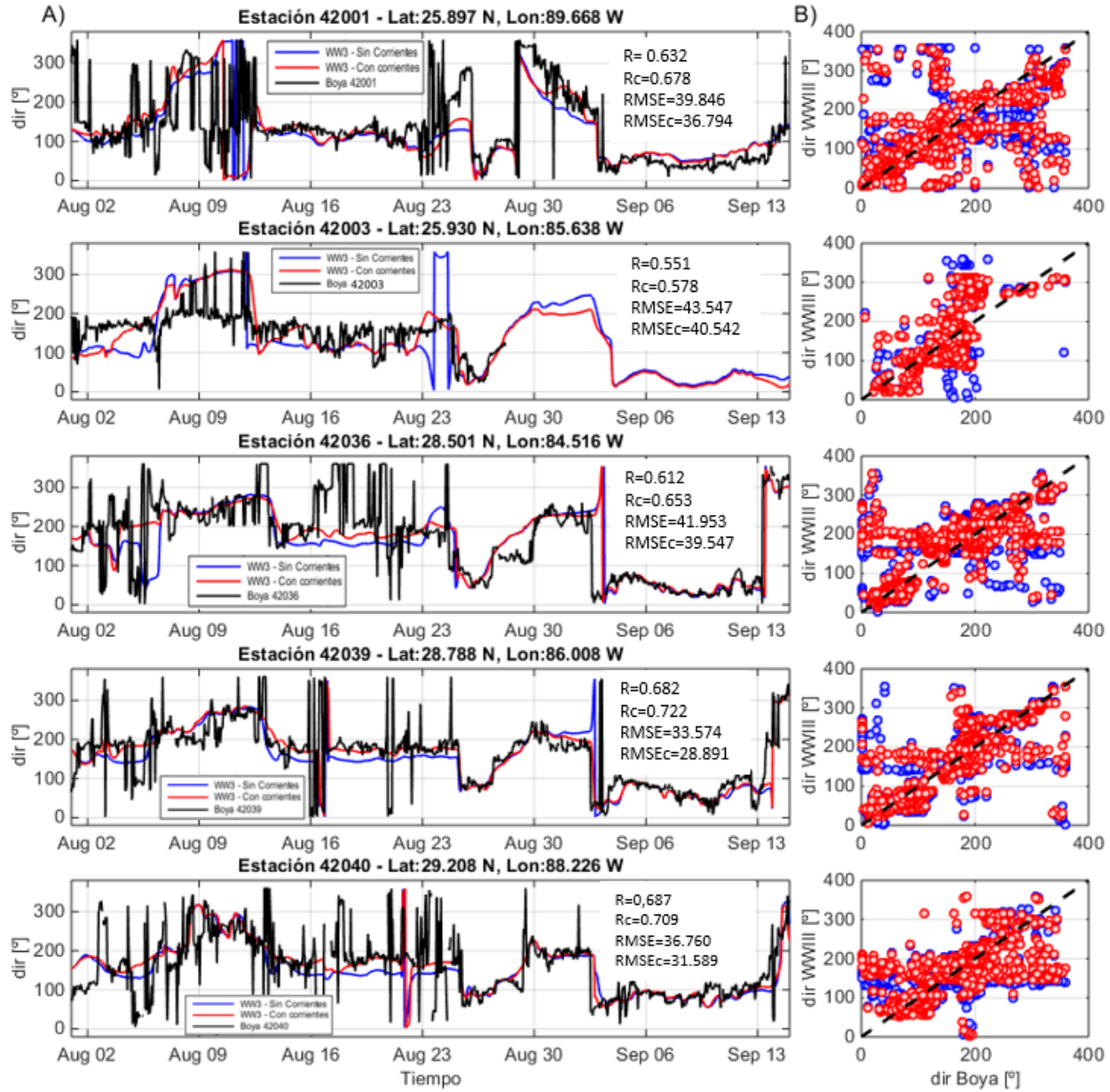


Figura 4-12.: Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de dirección pico del oleaje (θ_p), durante el paso del huracán Katrina. (A) Comparación de las series temporales de dirección pico del oleaje (θ_p) calculado con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42003, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de dirección pico (θ_p) y el valor de los índices estadísticos.

La Tabla 4-2 muestra los parámetros estadísticos básicos: error cuadrático medio (RMSE), índice *bias*, y error de correlación (R) (ver sección 3.4.3), que se obtienen al comparar las series temporales de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p) con y sin corrientes, con las mediciones de las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. Los resultados presentados en tabla corresponden a los estadísticos de las series temporales presentadas anteriormente (ver Figuras 4-10, 4-11 y 4-12).

Tabla 4-2.: Parámetros estadísticos básicos de los parámetros escalares del oleaje durante el paso del huracán Katrina.

Boyas		42001			42036			42038			42039			42040		
Parámetros		R	RMSE	bias	R	RMSE	bias	R	RMSE	bias	R	RMSE	bias	R	RMSE	bias
Hs [m]	Sin Corrientes	0,954	0,310	-0,060	0,972	0,319	0,301	0,986	0,250	-0,221	0,983	0,322	-0,182	0,990	0,303	-0,172
	Corrientes	0,962	0,300	-0,144	0,974	0,302	0,231	0,986	0,226	-0,199	0,985	0,305	-0,179	0,992	0,306	-0,202
Tp [s]	Sin Corrientes	0,705	2,090	-0,229	0,784	1,900	-0,232	0,685	2,460	-0,252	0,780	2,140	-0,266	0,846	1,620	-0,185
	Corrientes	0,719	2,030	-0,211	0,805	1,730	-0,207	0,683	2,360	-0,225	0,772	2,080	-0,248	0,813	1,660	-0,179
Dir [°]	Sin Corrientes	0,632	39,846	-0,260	0,612	41,953	-0,194	---	---	---	0,682	33,574	-0,283	0,687	36,760	-0,185
	Corrientes	0,678	36,794	-0,243	0,653	39,547	-0,168	---	---	---	0,722	28,891	-0,290	0,709	31,589	-0,134

En las Figuras 4-10, 4-11 y 4-12, se observa que durante el paso del huracán Katrina, se presenta una disminución del error cuadrático medio (RMSE) de los parámetros escalares del oleaje: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (θ_p). Al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO en la simulación numérica, en comparación con las mediciones de las boyas 42001, 42036, 42038, y 42039 de la NOAA. En el caso de la boya 42040, se obtiene una mejor estimación de H_s y T_p con la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes superficiales, sin embargo al incluir el efecto de las corrientes se presenta una mejor estimación de θ_p . En la tabla 4-2, se observa que al incluir el efecto de las corrientes en la simulación numérica, se presenta un incremento del coeficiente de correlación (r), en comparación con las mediciones de las boyas, mientras el índice *bias* disminuye aproximándose a cero. Esto indica que al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente se presenta una mayor correlación entre los datos modelados y los datos medidos, y una disminución en la tendencia a sobrestimar o subestimar las mediciones de las series temporales de los parámetros escalares del oleaje.

A continuación, se analizan las variaciones que presentan las series temporales de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p), calculando la diferencia porcentual de los parámetros estadísticos básicos. La diferencia porcentual se estima para los estadísticos: error cuadrático medio (RMSE), índice *bias* y coeficiente de correlación (r), a partir de la siguiente expresión:

$$Error\ Porcentual = 100 \times \frac{\beta_{corrientes} - \beta_{Sin\ corrientes}}{\beta_{Sin\ corrientes}} \quad (4-2)$$

donde β corresponde a cada uno de los parámetros estadísticos básicos calculados (RMSE, R y *bias*). El efecto de la interacción ola-corriente presenta una disminución entre el 3 % y 10 % del RMSE de la altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), y entre el 5 % y 14 % del RMSE de la dirección pico del oleaje (θ_p). En el caso del coeficiente de correlación (R), se presenta una

mejor estimación al incluir las corrientes, incrementando entre el 1 % y 2 % para H_s , entre el 2 % y 4 % para T_p , y entre el 3 % y 8 % para el coeficiente de correlación de θ_p . En la estimación del índice *bias* se presentan variaciones entre el 10 % y 25 % del índice *bias* de H_s , entre el 7 % y 10 % para T_p , y entre el 6 % y 27 % del *bias* de θ_p . Las diferencias que se presentan en la estimación de los parámetros estadísticos básicos indican que el efecto de la interacción ola-corriente arroja una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje, presentando una mayor correlación entre los datos medidos y los datos modelados, y una disminución en la tendencia a subestimar o sobrestimar los datos medidos.

En la Figura 4-10, la gráfica de dispersión de puntos de altura de ola significativa (H_s) muestra que en condiciones extremas de viento, presenta una mejor tendencia en la nube de puntos al incluir el efecto del campo de corrientes, para valores mayores a $H_s = 3$ m. De igual forma, la dispersión de puntos del periodo pico (T_p) (ver Figura 4-11), presenta una mejor tendencia de la nube de puntos para valores mayores a $T_p = 8$ s, que corresponden al periodo de huracán. En el caso de la dirección pico del oleaje (θ_p) (ver Figura 4-12), la dispersión de puntos presenta valores más alejados de la tendencia ideal, lo cual se debe a las variaciones bruscas que presenta la serie medida por la boya. Sin embargo, se observa que al tener en cuenta las corrientes hay una mejor tendencia de la nube de puntos. Estos resultados indican que al incluir el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, la modelación presenta una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje en condiciones extremas de viento durante el paso del huracán Katrina.

Siguiendo con la comparación de los resultados con y sin corrientes, se calculan las diferencias de magnitud y el error porcentual de los parámetros escalares de altura de H_s y T_p usando las siguientes expresiones:

$$Diferencia = H_{S,corrientes} - H_{S,sinCorrientes} \quad (4-3)$$

$$ErrorPorcentual = \frac{(H_{S,corrientes} - H_{S,sinCorrientes})}{H_{S,sinCorrientes}} \times 100 \quad (4-4)$$

La Figura 4-13 presenta los resultados obtenidos para la diferencias de magnitud y el error porcentual de las series temporales de H_s y T_p , con y sin corriente, en los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040; las cuales son usadas para validar los resultados obtenidos con la simulación numérica.

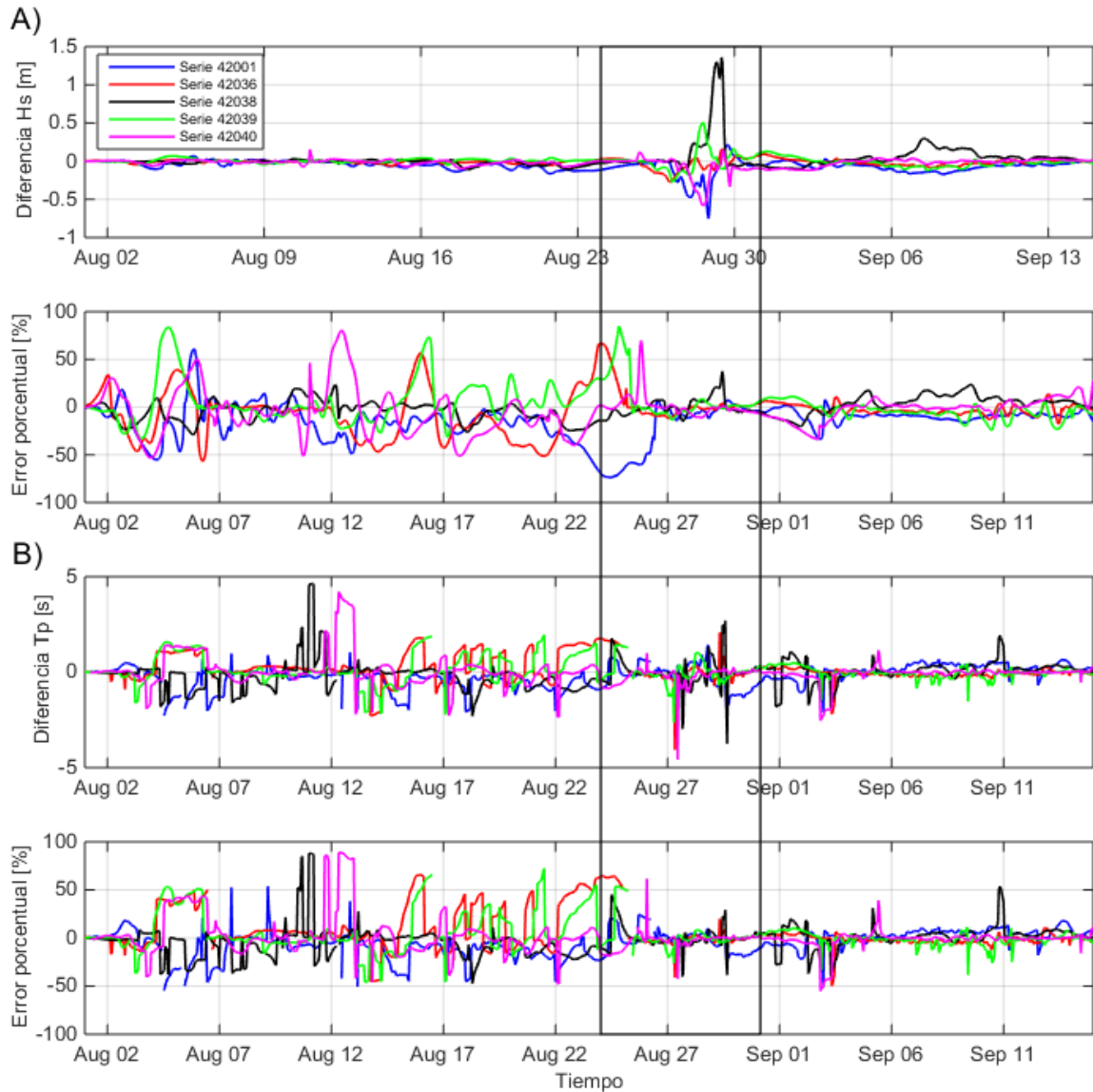


Figura 4-13.: Cambios en la magnitud de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. Diferencia y error porcentual de (A) H_s y (B) T_p . Las series se obtienen en los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. El recuadro negro indica el periodo del huracán (23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00).

En la Figura 4-13 se observa que el cambio de la magnitud en las series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) no es muy significativo al tener en cuenta el efecto de las corrientes durante condiciones débiles de viento. Sin embargo, en condiciones extremas se presentan las mayores diferencias de magnitud. Durante el periodo del huracán Katrina (23/08/2005 00:00:00 hasta 01/09/2005 00:00:00) se presentan las mayores diferencias en la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) al incluir el campo de corrientes. En la parte A) de la figura, se observa que en la boya 42038 el efecto de las corrientes produce un efecto de asomeramiento, incrementando la altura de ola hasta 1,4 metros, lo que corresponde a una diferencia porcentual de 37,5 % en

comparación con la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes. En el caso de la boya 42001 se produce el efecto contrario, hay una disminución de la altura de ola significativa (H_s) de 0,7 metros (-6%). En general, en las primeras fechas durante el periodo de huracán (23/08/2005 00:00:00 hasta 26/08/2005 00:00:00), las diferencias porcentuales de la altura de ola significativa (H_s) oscilan entre -60% y 60% , y en las fechas que se presenta el oleaje con mayor energía (26/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00), las diferencias porcentuales oscilan entre -10% y 40% . El periodo que corresponde a las condiciones débiles de viento antes del paso del huracán Katrina (01/08/2005 00:00:00 hasta 23/08/2005 00:00:00) presenta diferencias de máximo 15 cm al incluir el campo de corrientes. Sin embargo, se observa en la figura del error porcentual que las diferencias con respecto a la magnitud del parámetro de altura de ola significativa (H_s) sin incluir el campo de corrientes, presentan valores que oscilan entre -50% y 50% , con valores picos del error porcentual de -72% y 79% . Los valores máximos del error porcentual se presentan en la estimación de los valores de altura de ola significativa que son menores a $H_s = 0,38$ metros, donde variaciones pequeñas de la magnitud representan una diferencia porcentual alta. Se observa que para el periodo posterior al huracán (01/09/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00), que también corresponde a condiciones débiles de viento, se presentan diferencias de magnitud de máximo 25 cm, con errores porcentuales que oscilan entre -18% y 15% , presentando valores picos que van hasta -33% y 23% . El rango de magnitud del error porcentual de H_s , para el periodo posterior al paso del huracán, concuerda con los resultados obtenidos por Montoya (2013). En este último estudio se analizó el efecto de la interacción ola-corriente en condiciones débiles de viento, en un rango de magnitud de altura de ola significativa similar a los valores que se presentan en el periodo de tiempo posterior al paso del huracán, obteniendo diferencias porcentuales que varían entre -20% y 20% .

En la estimación del periodo pico (T_p), se observa que el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, produce variaciones bruscas y rápidas durante ciertos períodos aleatorios, lo que produce diferencias porcentuales altas, como se puede observar en la parte B) de la Figura 4-13. Las diferencias que se presentan en la magnitud del periodo pico (T_p), oscilan entre -2 y 2 segundos, presentando valores picos que van hasta $-4,5$ y $4,6$ segundos. El periodo que corresponde al huracán entre las fechas 23/08/2005 00:00:00 y 01/09/2005 00:00:00, presenta diferencias que oscilan entre $-4,5$ (-40%) y $2,8$ (30%) segundos. Las mayores diferencias del periodo pico (T_p) se presentan en el periodo que corresponde a las condiciones débiles de viento antes del paso del huracán (01/08/2005 00:00:00 hasta 23/08/2005 00:00:00), donde se presentan diferencias porcentuales que oscilan entre -50% y 50% , aunque se presentan valores picos que llegan hasta -52% y 87% . En el periodo posterior al paso del huracán (01/09/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00) hay una disminución de las diferencias porcentuales del periodo pico (T_p), las diferencias que se presentan oscilan entre -15% y 15% , presentando valores picos que van hasta -55% y 50% .

Al tener en cuenta el efecto de las corrientes en la estimación de las series temporales de dirección pico del oleaje (θ_p) se presentan diferencias que oscilan entre -25° y 45° , durante el periodo que corresponde a condiciones débiles de viento antes del paso del huracán. En este mismo periodo se presentan diferencias porcentuales que varían entre -20% y 40% en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el efecto del campo de corrientes. Durante el periodo del huracán

se presentan diferencias entre -10° y 10° , y errores porcentuales que oscilan entre -20% y 20% . En el periodo posterior al paso del huracán (01/09/2005 00:00:00 hasta 15/09/2005 00:00:00) que representa condiciones débiles de viento, se presentan diferencias que oscilan entre -15° y 15° , con errores porcentuales entre -20% y 20% . Los errores porcentuales del periodo pico (T_p) y la dirección pico del oleaje (θ_p), en condiciones débiles de viento, concuerdan con los resultados obtenidos por Montoya et al. (2013) en el análisis de la interacción ola-corriente. Los valores máximos de error porcentual en la estimación de la dirección de la ola se presentan en los instantes de tiempo donde hay variaciones bruscas, generando valores picos que alcanzan diferencias porcentuales por encima del 100% , en comparación con los resultados obtenidos con la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes. El efecto de la interacción ola-corriente produce un cambio en la serie temporal de dirección, presentando un mejor ajuste, en comparación con las boyas.

El efecto de las corrientes superficiales produce asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s), dependiendo de la dirección relativa entre las corrientes y el oleaje. A continuación, en las siguientes figuras, se compara la dirección relativa entre el oleaje y las corrientes, con las diferencias porcentuales de la altura de ola significativa (H_s). La Figura 4-14 presenta la dirección del oleaje (flecha negra), la dirección de las corrientes (flechas de colores) y el error porcentual de la altura de ola significativa (línea continua) para el periodo de simulación, estimada con la ecuación 4-4. Las flechas indican de dónde proviene el oleaje (θ_w) y las corrientes (θ_c), teniendo en cuenta el norte como 0° , e incrementando en sentido horario. Los resultados se presentan para las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040, durante el paso del huracán Katrina.

La Figura 4-15 en la parte A) presenta la serie temporal de la dirección del oleaje (líneas continuas) calculada con el modelo de oleaje WWIII, y la dirección de las corrientes (líneas punteadas) que se obtiene a partir de los datos de corrientes superficiales de AVISO, en los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040, durante el paso del huracán Katrina. La parte B) de la figura 4-15 presenta el ángulo α , que corresponde a la dirección relativa entre las corrientes y la dirección que tiene el oleaje. El ángulo α se estima como $\alpha = \theta_c - \theta_w$, donde θ_c corresponde a la dirección del campo de corrientes para el instante de tiempo analizado, y θ_w corresponde a la dirección del oleaje. El ángulo α presenta valores negativos y positivos. Luego, se definen las regiones de asomeramiento ($U \cos \alpha < 0$) en rojo y las regiones donde disminuye la altura de la ola ($U \cos \alpha > 0$) en azul, tanto para valores positivos, como valores negativos de α . Las regiones que están sombreadas de color rojo corresponden al rango de direcciones que está entre 90° y 270° , y la región que está de color azul corresponde a las direcciones que están entre los rangos $0^\circ - 90^\circ$ y $270^\circ - 360^\circ$. De igual forma, se presentan las regiones sombreadas en rojo para los rangos entre -90° y -270° , y en color azul para los valores que están entre los rangos 0° y -90° , -270° y -360° . En esta gráfica los puntos corresponden a la diferencia entre la dirección de las corrientes y la dirección del oleaje, los cuales se estiman en la hora 00:00:00 para todas las fechas durante el periodo de simulación, esto debido a que los datos de corrientes tienen una resolución diaria. La parte C) de la figura, presenta el efecto de las corrientes en la estimación de la altura de ola significativa (H_s), definido para cada instante de tiempo como H_s+ , si se presentó asomeramiento o H_s- , si hay disminución de la altura de la ola. Si el punto está en la parte superior de la gráfica

indica que hay asomeramiento y si está ubicado en la parte inferior indica que hay disminución de la altura de ola significativa (H_s). Este análisis se realiza en los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas de la NOAA. La parte D) de la figura presenta el error porcentual de la altura de ola significativa (H_s), al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. La diferencia porcentual se calcula con la ecuación 4-4, a partir de la magnitud de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) para las simulaciones con y sin corrientes.

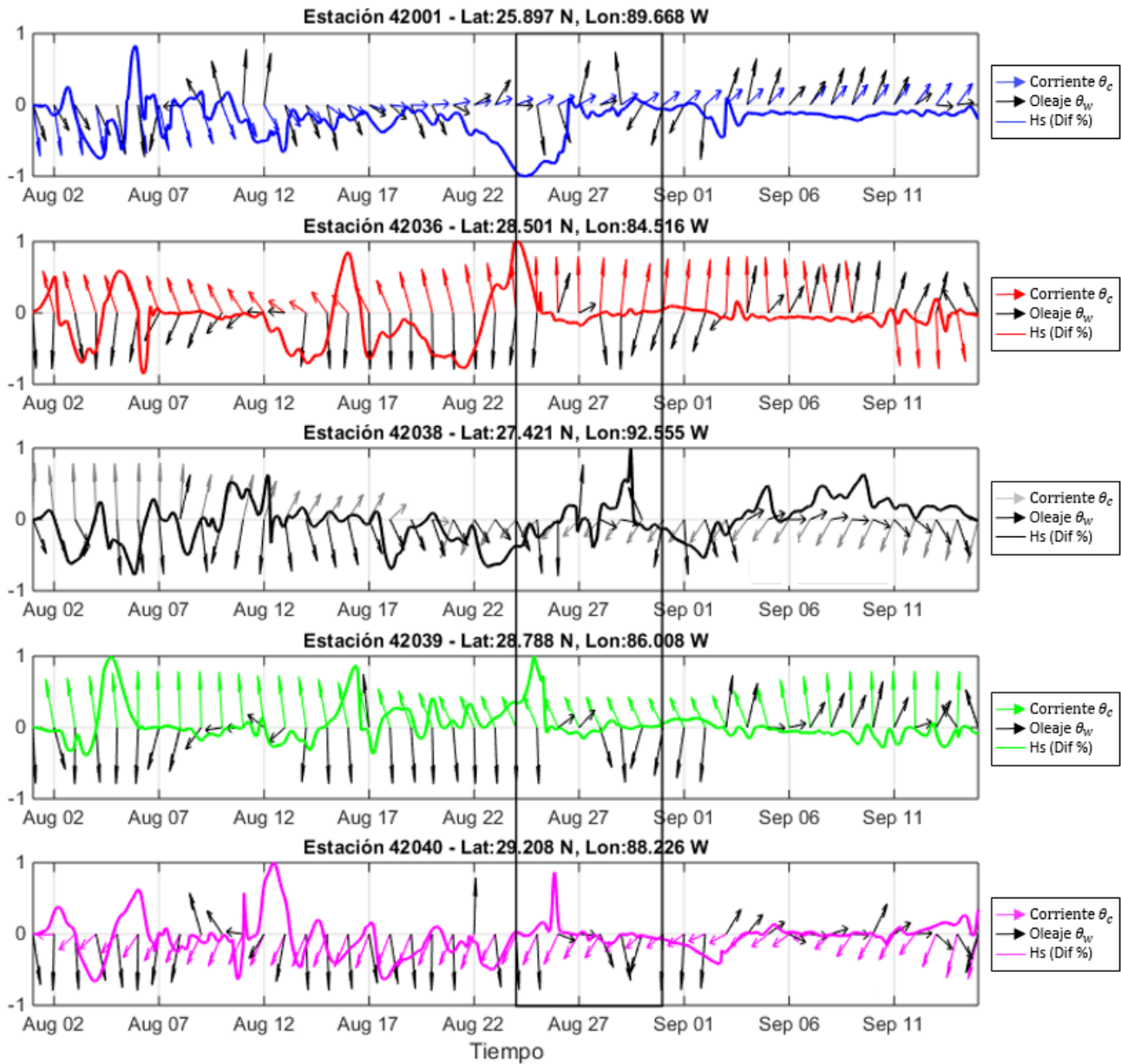


Figura 4-14.: Dirección de la corriente (flecha de color) y dirección del oleaje (flecha negra). Se presenta la diferencia porcentual de las series temporal de altura de ola significativa (H_s) estimada con la ecuación 4-4. El recuadro negro indica el periodo del huracán Katrina (23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00).

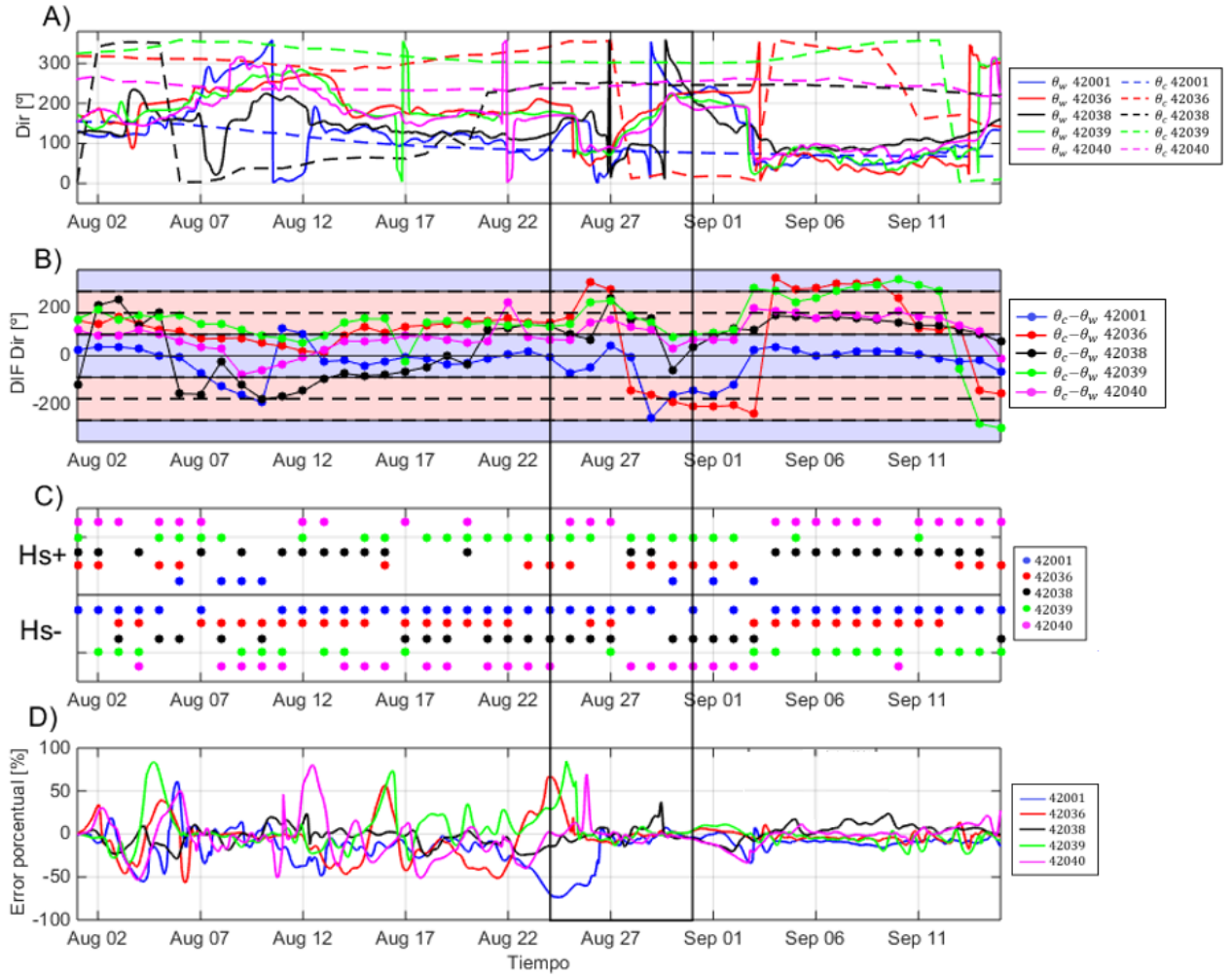


Figura 4-15.: Relación de la dirección relativa α y el asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s). (A) Dirección de las corrientes de AVISO y dirección del oleaje modelado. (B) Dirección relativa entre el oleaje y las corrientes α . (C) asomeramiento o disminución de la altura de ola significativa (H_s). (D) Diferencias porcentuales de altura de ola significativa (H_s). El recuadro negro indica el periodo del huracán Katrina (23/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00).

En la Figura 4-14 y en la gráfica A) de la Figura 4-15 se observa que hay una mayor variabilidad de la dirección del oleaje θ_w , en comparación con la dirección de las corrientes θ_c . El comportamiento de la dirección de las corrientes (líneas punteadas - flechas colores) varía en un rango menor de direcciones para la mayoría de instantes del periodo de simulación, mientras la dirección del oleaje (líneas continuas - flechas negras) calculada con el modelo con corrientes, presenta oscilaciones en un rango mayor de direcciones. La dirección de las corrientes presenta un comportamiento suavizado en la serie temporal, en comparación con las variaciones que se presentan en la dirección del oleaje. En la parte B) de la figura 4-15 se observa que el ángulo ($\alpha = \theta_c - \theta_w$) entre la dirección de las corrientes y el oleaje, presenta variaciones en todo el rango de direcciones, tanto en condiciones débiles de viento, como en condiciones extremas de huracán.

El efecto de la interacción ola-corriente produce un asomeramiento de la ola cuando la dirección de las corrientes es opuesta a la dirección del oleaje ($U \cos \alpha < 0$), y una disminución de la altura de la ola, cuando la dirección de las corrientes es favorable ($U \cos \alpha > 0$). En la ubicación que corresponde a la boya 42001, el ángulo α entre la dirección de la corriente (θ_c) y el oleaje (θ_w) varía entre -90° y 90° para la mayoría de instantes del periodo de simulación (puntos azules). En la gráfica C) de la figura 4-15, para los mismos instantes donde $U \cos \alpha > 0$ en B), se presenta una disminución de la altura de ola significativa (puntos azules) al tener en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales en la modelación espectral. En el punto que corresponde a la boya 42039 se presenta un incremento de la altura de ola significativa (H_s) en la mayoría de instantes de tiempo, en este caso la dirección relativa (α) entre el oleaje y las corrientes presentan valores que oscilan entre 90° - 270° . En general, se observa que hay una relación entre la disminución de la altura de ola significativa (H_s) cuando el ángulo α entre la dirección de las corrientes y el oleaje se ubica en la región roja de la gráfica, que corresponde al rango de direcciones que está entre 90° y 270° . De igual forma, se presenta una relación entre la disminución de la altura de ola significativa (H_s) cuando la diferencia se ubica en la región azul, que corresponde a las direcciones que están entre los rangos 0° - 90° y entre 270° - 360° . Teniendo en cuenta esta relación entre la variación de la altura de ola significativa (H_s) y el ángulo entre la dirección de las corrientes y la dirección del oleaje (α), se obtiene que en la ubicación que corresponde a la boya 42001, el 87 % de los instantes analizados, presenta un asomeramiento de la ola cuando α está entre 90° y 270° y una disminución de la altura de ola significativa (H_s) cuando el ángulo (α) está entre 0° - 90° y 270° - 360° . Realizando el mismo análisis para las demás series, se obtiene que la cantidad de instantes que presentan este comportamiento corresponden al 72 % para el punto 42036, el 76 % para el punto 42038, el 78 % para los puntos 42039, y 76 % para la boya 42040. Esto indica que hay una relación entre la dirección relativa (α) de las corrientes y el oleaje, y los efectos de asomeramiento y disminución de la altura de ola significativa (H_s). Las boyas ubicadas en aguas profundas presentan la mayor cantidad de instantes en los que se cumple la relación entre el ángulo α y el efecto de asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s) durante condiciones débiles de viento y condiciones extremas de huracán.

Los instantes en los que no se cumple la relación entre el ángulo (α) y el efecto de asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s) pueden estar relacionados con los errores que se presentan en la estimación de la dirección pico del oleaje (θ_p) con el modelo WWIII, y en las mediciones satelitales del campo de corrientes superficiales de AVISO (θ_c). Además, es importante analizar las interacciones del oleaje con la atmósfera y el océano, y las interacciones no lineales ola-ola, para estudiar el aporte de energía al oleaje que produce tanto efectos de asomeramiento como disminución de la altura de ola significativa (H_s).

4.2.2. Huracán Rita

La Figura 4-16 presenta la comparación de la altura de ola significativa (H_s) calculada con el modelo de oleaje WWIII incluyendo las corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Rita. Las series temporales son comparados con las simulaciones que no incluyen el efecto de las corrientes, y con los datos medidos de las boyas de la NOAA.

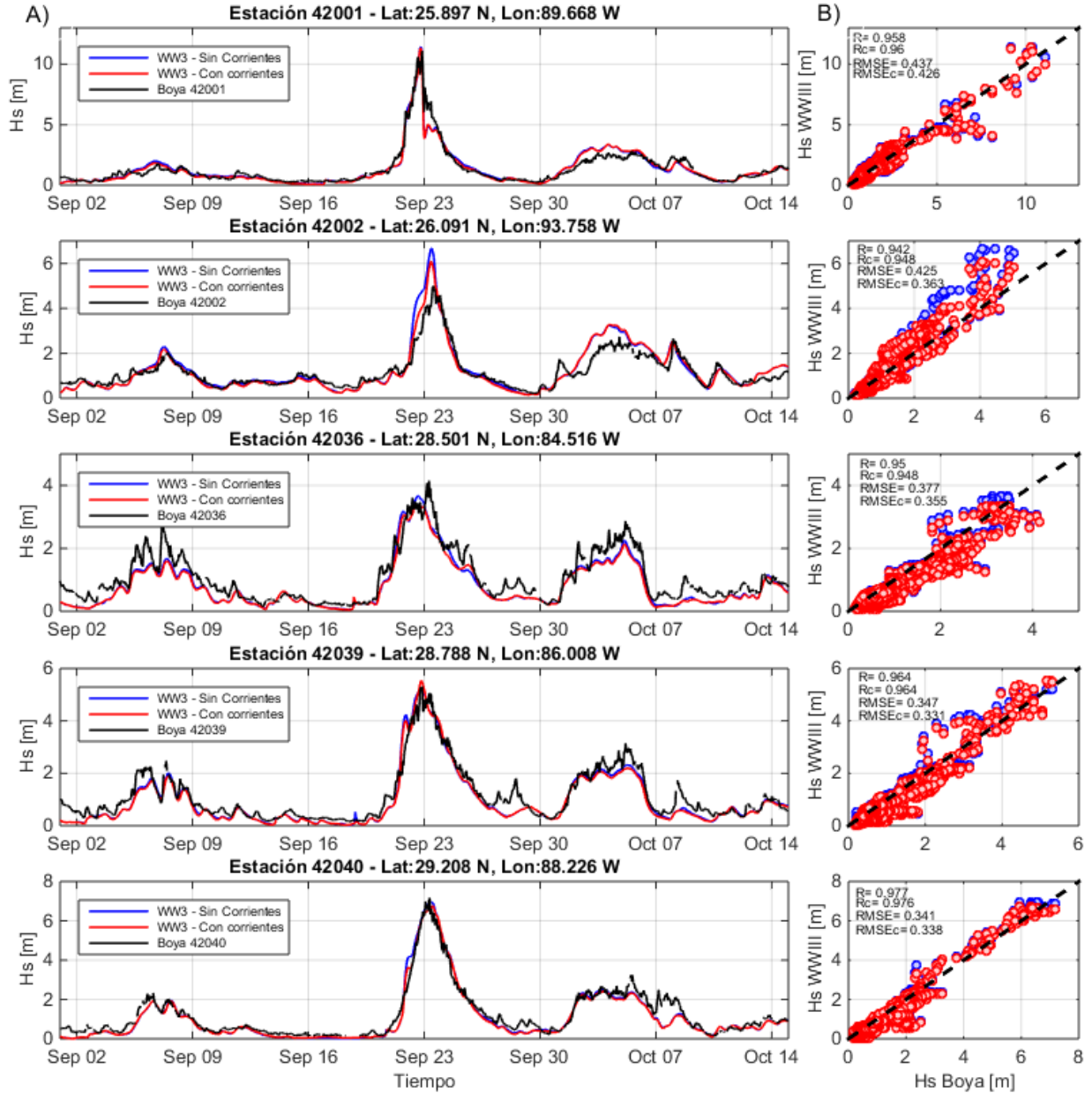


Figura 4-16.: Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s), durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de las series temporales de altura de H_s calculada con el modelo de oleaje WWIII, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de altura de ola significativa (H_s) y valores de los índices estadísticos.

La Figura 4-17 presenta la comparación del periodo pico (T_p) calculado con el modelo de oleaje WWIII con y sin corrientes, durante el paso del huracán Rita. Los resultados de las series son comparados datos mediciones de las boyas de la NOAA.

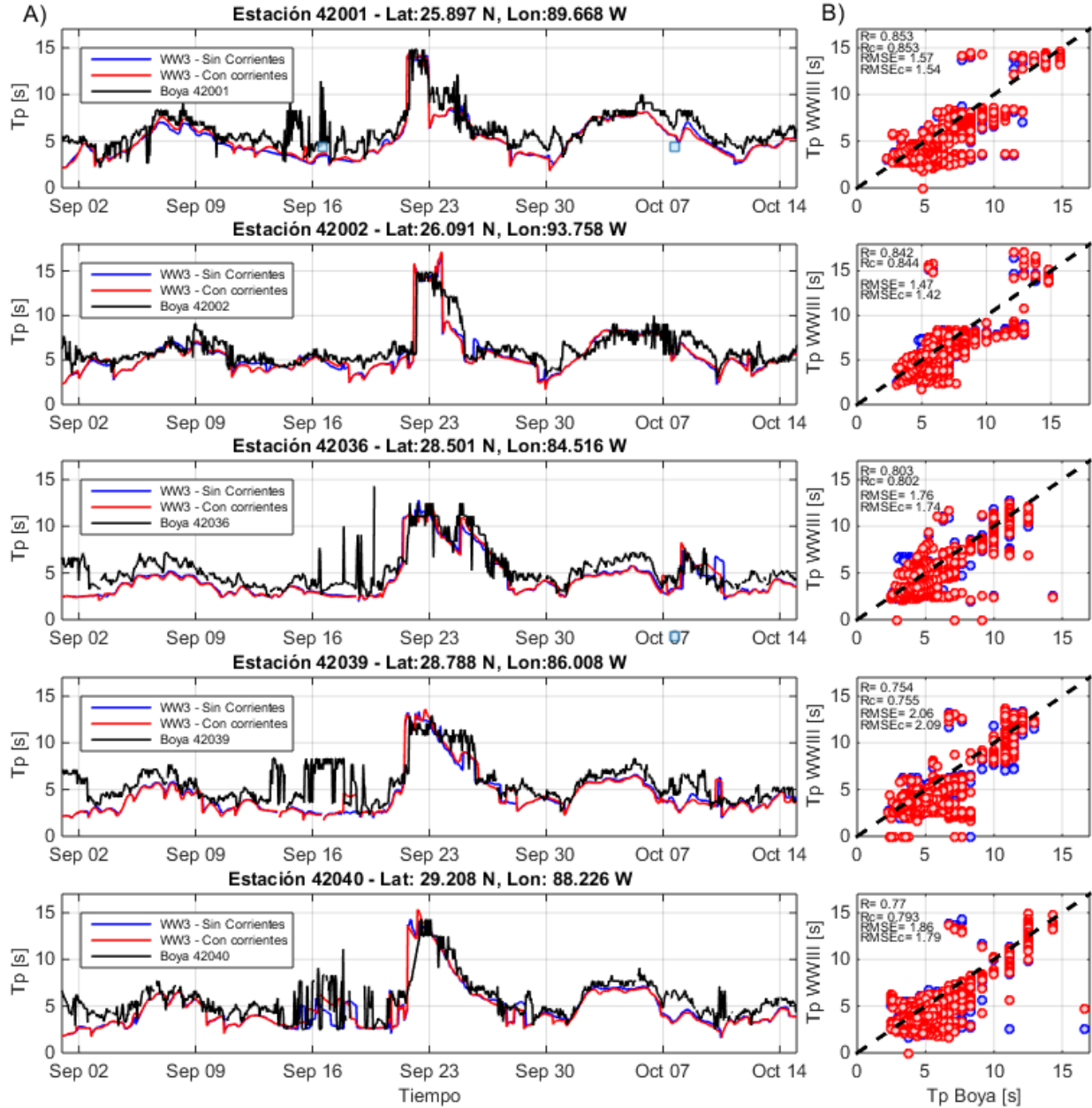


Figura 4-17.: Efecto de la interacción ola corriente en el parámetro escalar de periodo pico (T_p), durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de las series temporales de periodo pico (T_p) calculado con el modelo de oleaje (WWIII), teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de periodo pico (T_p) y el valor de los índices estadísticos.

La Figura 4-18 presenta la comparación de dirección pico del oleaje (θ_p) calculada con el modelo de oleaje WWIII, incluyendo las corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Rita. Los datos son comparados con las simulaciones que no incluyen el efecto de las corrientes y con los datos medidos de las boyas de la NOAA.

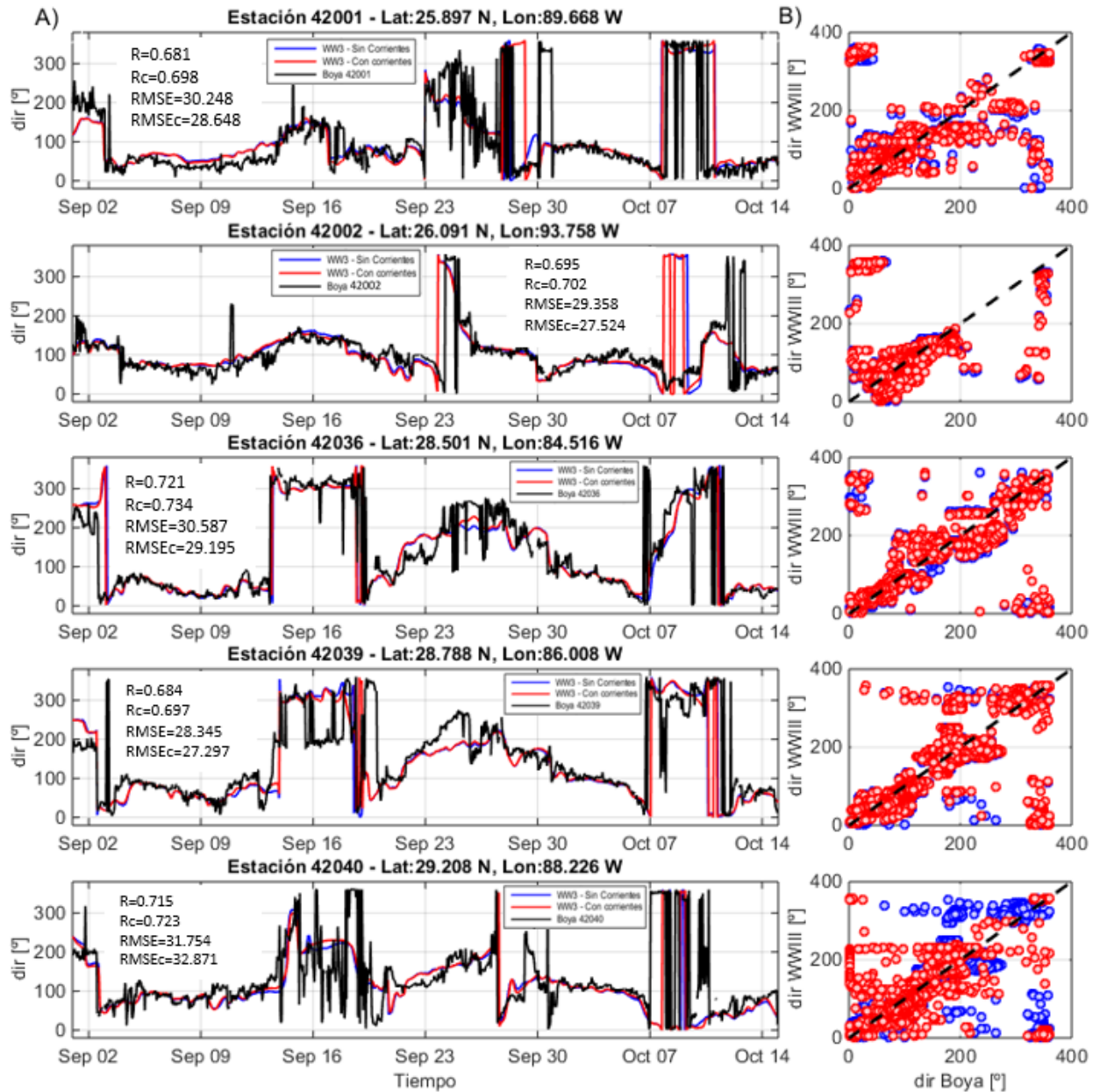


Figura 4-18.: Efecto de la interacción ola corriente en las series temporales del parámetro escalar de dirección pico del oleaje (θ_p), durante el paso del huracán Rita. (A) Comparación de las series temporales de θ_p calculada con el modelo de oleaje WWIII teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y los datos medidos por las boyas 42001,42002,42036,42039 y 42040 de la NOAA. (B) Dispersión de puntos de las series modeladas de θ_p y valores de los índices estadísticos.

La Tabla 4-3 presenta los valores de los parámetros estadísticos básicos: error cuadrático medio (RMSE), índice *bias*, y error de correlación (R) (ver sección 3.4.3), que se obtienen al comparar las series temporales de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p) con y sin corrientes, con las mediciones de las boyas 42001, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. Los resultados presentados en tabla corresponden a los estadísticos de las series temporales presentadas anteriormente (ver Figuras 4-16, 4-17 y 4-18).

Tabla 4-3.: Parámetros estadísticos básicos de los parámetros escalares del oleaje, durante el paso del huracán Rita.

Boyas		42001			42002			42036			42039			42040		
Parámetros		R	RMSE	bias	R	RMSE	bias	R	RMSE	bias	R	RMSE	bias	R	RMSE	bias
Hs [m]	Sin Corrientes	0,958	0,437	0,009	0,942	0,425	0,076	0,950	0,377	-0,253	0,964	0,347	-0,173	0,977	0,341	-0,147
	Corrientes	0,960	0,426	-0,015	0,948	0,363	0,023	0,948	0,355	-0,223	0,964	0,331	-0,145	0,976	0,338	-0,129
Tp [s]	Sin Corrientes	0,853	1,570	-0,166	0,842	1,470	-0,105	0,803	1,760	-0,190	0,754	2,060	-0,227	0,770	1,860	-0,177
	Corrientes	0,853	1,540	-0,015	0,844	1,420	-0,072	0,802	1,740	-0,194	0,755	2,090	-0,228	0,793	1,790	-0,179
Dir [°]	Sin Corrientes	0,681	30,248	0,126	0,695	29,358	0,125	0,721	30,587	0,095	0,684	29,345	-0,213	0,715	31,754	0,121
	Corrientes	0,698	28,648	0,119	0,702	27,524	0,095	0,734	29,195	0,089	0,697	27,297	-0,205	0,723	32,871	0,109

En el caso del huracán Rita, en las figuras 4-16, 4-17 y 4-18, se observa que tanto para las boyas ubicadas en aguas profundas (42001 y 42002), como las boyas ubicadas cerca a la plataforma continental (42036, 42038 y 42040) se presenta una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación. Además, en la tabla 4-3 se observa, que el efecto de la interacción ola-corriente presenta una disminución entre el 3 % y 15 % del error cuadrático medio (RMSE) de la altura de ola significativa (H_s), entre el 3 % y 5 % del periodo pico (T_p), y entre el 5 % y 7 % del RMSE de la dirección pico del oleaje (θ_p). En el caso del coeficiente de correlación (R), se presenta una mejor estimación al incluir las corrientes, incrementando entre el 1 % y 2 % del coeficiente de correlación (R) de altura de ola significativa (H_s), entre el 2 % y 4 % periodo pico (T_p), y entre el 1 % y 3 % del coeficiente de correlación de la dirección pico del oleaje (θ_p). En el caso del índice *bias* se presentan variaciones entre el 5 % y 18 % de altura de ola significativa (H_s), entre el 5 % y 31 % para el periodo pico (T_p), y entre el 5 % y 24 % del *bias* de la dirección pico del oleaje (θ_p). La disminución del RMSE en la mayoría de las boyas indica que el efecto de la interacción ola-corriente presenta una mejor estimación de los parámetros escalares. Además, se presenta un incremento de R, el cual indica que el efecto de las corrientes presenta una mayor correlación entre los datos modelados y datos medidos. La disminución del índice *bias* indica que hay una menor tendencia a subestimar o sobrestimar los datos medidos por las boyas de la NOAA. Esto resultados indican que en condiciones extremas de viento, durante el paso del huracán Rita, al incluir el efecto de las corrientes superficiales de AVISO en el modelo se presenta una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje.

La Figura 4-19 presenta las diferencias de magnitud de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), al considerar el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral, en comparación con la modelación que no incluye el efecto de las corrientes. El cálculo se hace usando las ecuaciones 4-3 y 4-4 para los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas 42001, 42002, 42038, 42039 y 42040, usadas para validar los resultados.

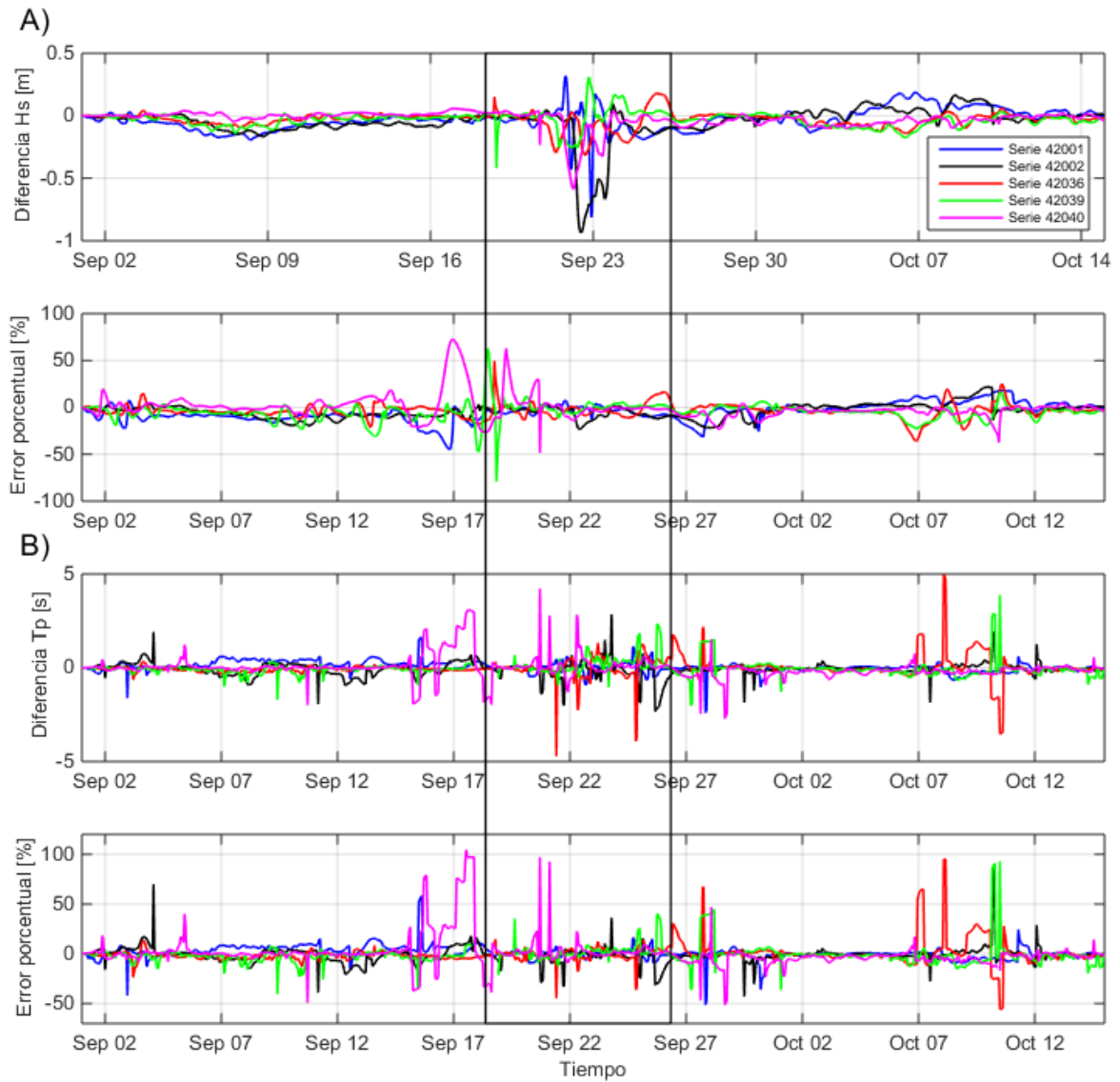


Figura 4-19.: Cambios en la magnitud de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. Diferencia y error porcentual de (A) H_s y (B) T_p . Las series se obtienen en la ubicación de las boyas de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. El recuadro negro indica el periodo del huracán (19/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00).

En el caso del huracán Rita, en el periodo que corresponde a condiciones débiles de viento antes del paso del huracán (01/09/2005 00:00:00 hasta 18/09/2005 00:00:00) se presentan diferencias en la magnitud de la altura de ola significativa de máximo 18 cm al incluir el campo de corrientes. Esto corresponde a diferencias porcentuales que oscilan entre -20% y 25% , presentando valores picos que llegan hasta -69% y 72% . Los valores máximos del error porcentual se presentan en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) en los instantes donde las mediciones de las boyas registran valores menores a los 0,35 metros. En comparación con el huracán Katrina, se obtiene una disminución de error porcentual de altura de ola significativa (H_s) en este periodo, dado que la magnitud de la altura de ola es mayor. Se observa que para el periodo posterior al huracán

(27/09/2005 00:00:00 hasta 15/10/2005 00:00:00), que también corresponde a condiciones débiles de viento, hay una disminución de las diferencias porcentuales de la altura de ola, donde las diferencias que se presentan oscilan entre -20% y 20% , presentando valores picos que van hasta -37% y 24% . Se observa que el efecto de las corrientes superficiales en la estimación del periodo pico (T_p) presenta diferencias de magnitud que oscilan entre -2 y 2 segundos, aunque se presentan picos que van hasta $-4,7$ y $4,9$ segundos, lo cual se debe a las variaciones bruscas del periodo pico (T_p). El periodo que corresponde al paso del huracán (18/09/2005 hasta 27/09/2005) presenta valores del error porcentual que oscilan entre -40% y 30% . Similar al parámetro de altura de ola significativa (H_s), las mayores diferencias de periodo pico (T_p) se presenta durante los primeros instantes del huracán en el Golfo de México. En el periodo que corresponde a condiciones débiles de viento antes del paso del huracán, se presentan diferencias porcentuales que oscilan entre -35% y 30% , con valores picos que llegan hasta -57% y 85% . En el periodo posterior al paso del huracán hay una disminución de las diferencias porcentuales del periodo pico (T_p), las diferencias que se presentan oscilan entre -10% y 10% , presentando valores picos que van hasta -50% y 90% , que concuerda con los resultados obtenidos por Montoya (2013).

En general, durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, se observa que al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente se obtiene una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje, disminuyendo el error cuadrático medio de las series temporales de altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p), en comparación con los datos medidos por las boyas de la NOAA. Además, se obtiene un incremento del coeficiente de correlación y una disminución del índice *bias*. A pesar de obtener una mejor estimación de los parámetros escalares, los estadísticos son muy parecidos. Sin embargo, se presentan diferencias porcentuales importantes entre la modelación con corrientes y sin corrientes. Es importante analizar las diferencias porcentuales de los parámetros escalares, ya que el error cuadrático medio tiene en cuenta todos los valores de la series, lo que no representa los instantes en los que hay mayores diferencias al tener en cuenta el efecto de las corrientes. Las diferencias de magnitud y el error porcentual de los parámetros escalares en condiciones débiles de viento concuerdan con los resultados obtenidos por Montoya (2013). En el periodo que corresponde a condiciones extremas de viento, se presentan mayores diferencias en la magnitud de los parámetros escalares del oleaje, sin embargo, no se presentan menores diferencias porcentuales al incluir el campo de corrientes en la modelación. Esto indica que es importante tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación para mejorar la estimación de los parámetros escalares del oleaje, durante condiciones extremas de viento de huracán.

La Figura 4-20 presenta la dirección de oleaje (flecha negra), la dirección del campo de corrientes (flecha colores) y el error porcentual de la altura de ola significativa (línea continua) para el periodo de simulación. Se analiza los efectos de asomeramiento y disminución de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta la dirección relativa entre las corrientes y el oleaje. Los resultados se presentan para las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040, durante el paso del huracán Rita. Las flechas indican de donde proviene el oleaje (θ_w) y las corrientes (θ_c), teniendo en cuenta el norte como 0° , e incrementando en sentido horario.

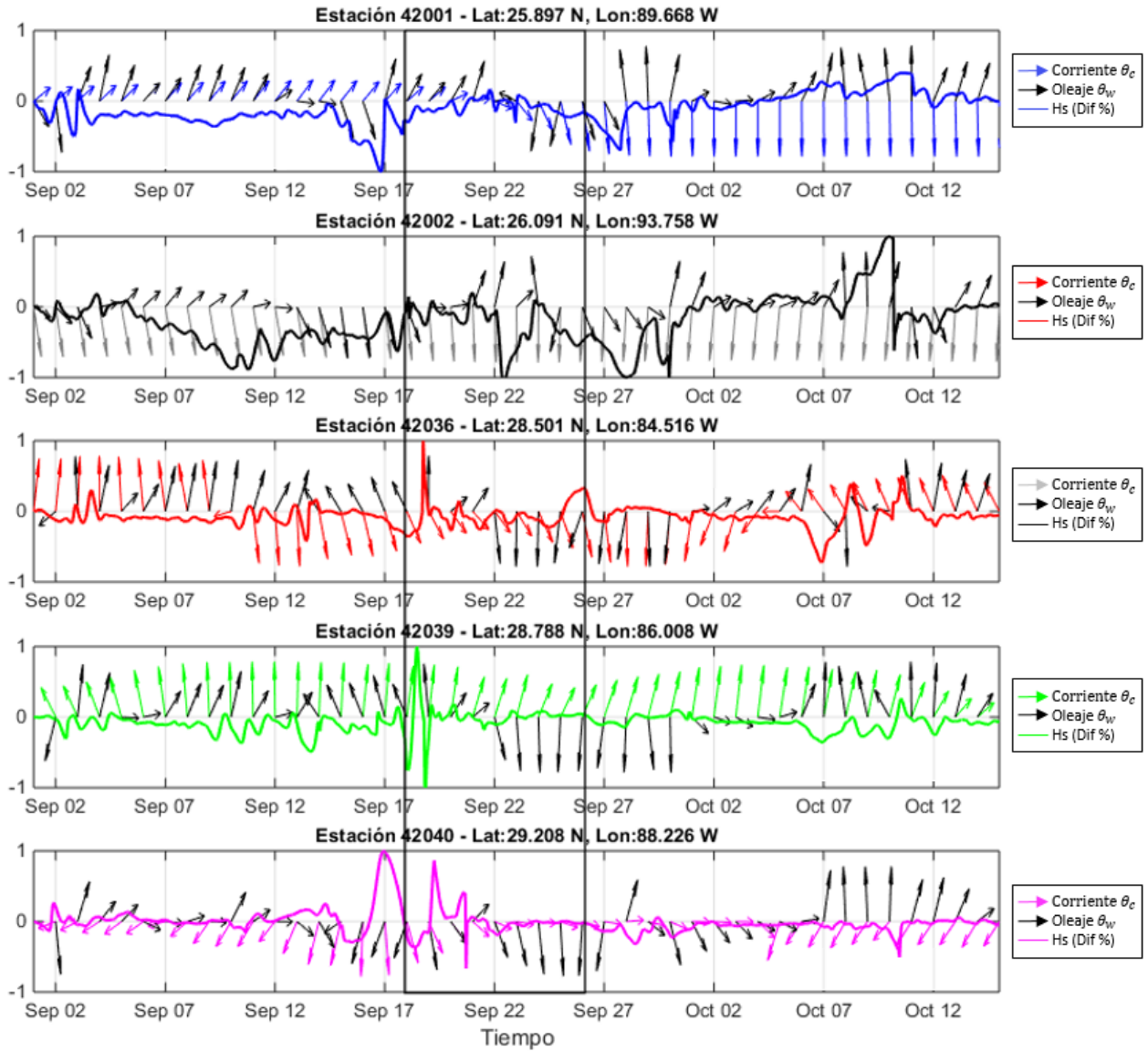


Figura 4-20.: Dirección de la corriente y dirección del oleaje. Se presenta el error porcentual que se obtiene. El periodo de simulación corresponde al paso del huracán Rita. El recuadro negro indica el periodo del huracán (19/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00).

La Figura 4-21 en la parte A) presenta la serie temporal de la dirección del oleaje (líneas continuas) calculada con el modelo de oleaje WWIII, y la dirección de las corrientes (líneas punteadas) que se obtiene a partir de los datos de corrientes superficiales de AVISO, en los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040, durante el paso del huracán Rita. La parte B) de la figura 4-21 presenta el ángulo α , que corresponde a la dirección relativa entre las corrientes y la dirección que tiene el oleaje ($\alpha = \theta_c - \theta_w$). Se definen las regiones de asomeramiento ($U \cos \alpha < 0$) en rojo y las regiones donde disminuye la altura de la ola ($U \cos \alpha > 0$) en azul, tanto para valores positivos, como valores negativos de α . En la gráfica, los puntos corresponden a la

diferencia entre la dirección de las corrientes y la dirección del oleaje, los cuales se estiman en la hora 00:00:00 para todas las fechas durante el periodo de simulación, esto debido a que los datos de corrientes tienen una resolución diaria. La parte C) de la figura presenta el efecto de las corrientes en la estimación de la altura de ola significativa (H_s), definiendo si se presentó asomeramiento (H_s+) o disminución de la altura de la ola (H_s-). La parte D) de la figura presenta el error porcentual de la altura de ola significativa (H_s), al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. La diferencia porcentual se calcula con la ecuación 4-4, a partir de la magnitud de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) para las simulaciones con y sin corrientes.

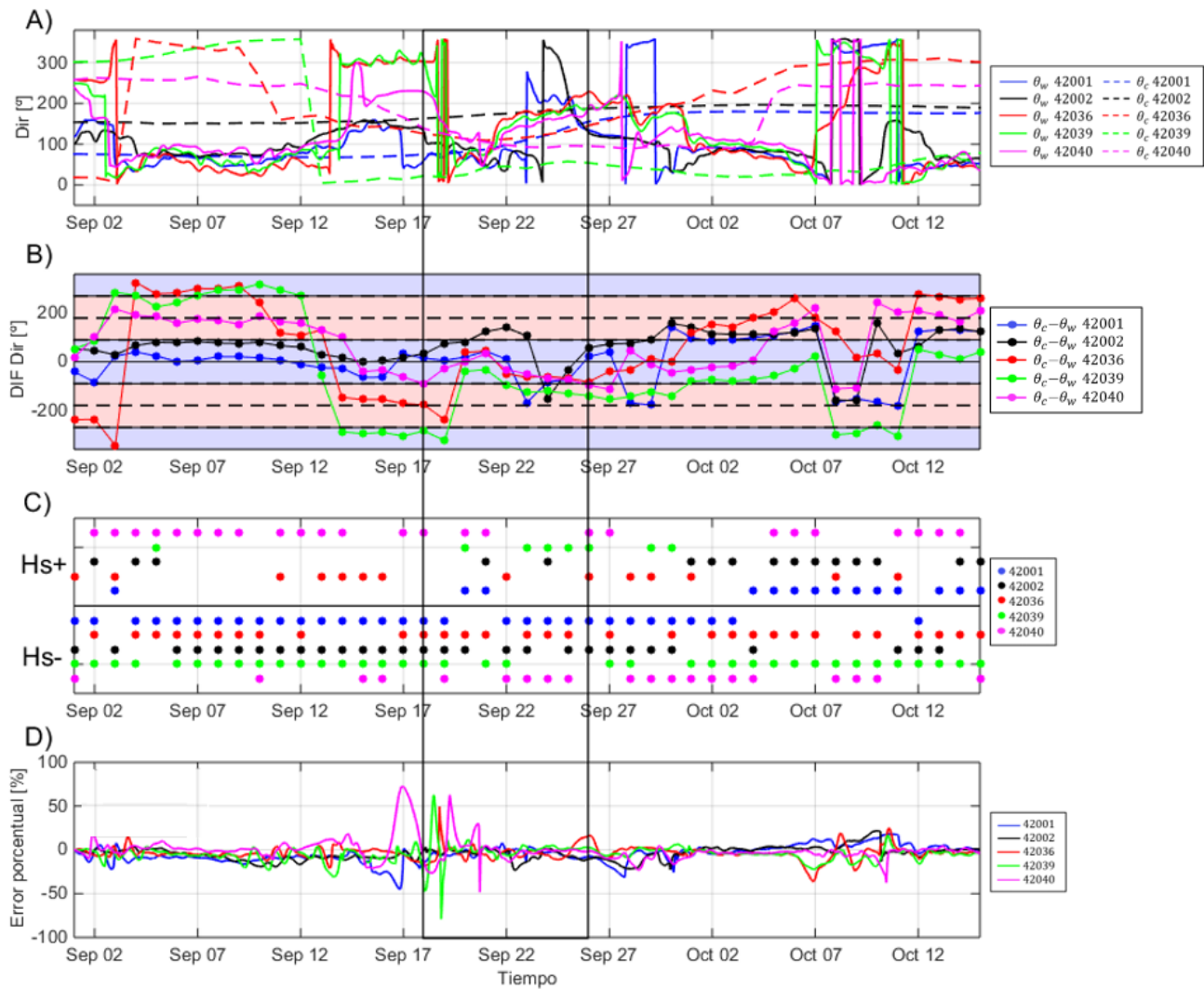


Figura 4-21.: Relación de la dirección relativa α y el asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s). (A) Dirección de las corrientes de AVISO y dirección del oleaje modelado. (B) Dirección relativa entre el oleaje y las corrientes. (C) Asomeramiento o disminución de la altura de ola significativa (H_s). (D) Diferencia porcentuales de altura de ola significativa (H_s). El análisis se realiza para los puntos que corresponden a la ubicación de las boyas 42001, 42002, 42036, 42039 y 42040, durante el periodo del huracán Rita. El recuadro negro indica el periodo del huracán (19/09/2005 00:00:00 hasta 26/09/2005 00:00:00).

En el caso del huracán Rita, se analiza el efecto de asomeramiento de la ola cuando la dirección de las corrientes es opuesta a la dirección del oleaje ($U \cos \alpha < 0$), y una disminución de la altura de la ola, cuando la dirección de las corrientes es favorable ($U \cos \alpha > 0$). Se presenta una relación entre la disminución de la altura de ola significativa (H_s) cuando la diferencia se ubica en la región azul, que corresponde a las direcciones que están entre los rangos $0^\circ - 90^\circ$ y entre $270^\circ - 360^\circ$. Teniendo en cuenta la relación entre la variación de la altura de ola significativa (H_s) y el ángulo (α) entre la dirección de las corrientes (θ_c) y la dirección del oleaje (θ_w), se obtiene que para la ubicación que corresponde a la boya 42001, en el 83 % de los instantes analizados, se presenta un asomeramiento de la ola cuando α está entre 90° y 270° y una disminución de la altura de ola cuando el ángulo (α) está entre $0^\circ - 90^\circ$ y $270^\circ - 360^\circ$ y el incremento de la altura de ola cuando el ángulo (α) está entre $90^\circ - 270^\circ$. Realizando el mismo análisis que en el caso del huracán Katrina, se obtiene para las demás series, que la cantidad de instantes que presentan este comportamiento corresponden al 85 % para el punto 42002, el 65 % para el punto 42036, el 89 % para la boya 42039 y 87 % para la boya 42040. En la mayoría de instantes de tiempos analizados hay una correlación positiva entre el ángulo α y el efecto de asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s). Esto indica que hay una relación en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) y la dirección relativa entre el oleaje y las corrientes, durante condiciones débiles y extremas de viento, durante el paso del huracán Rita. Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos con la simulación numérica presentan errores en la estimación de la dirección pico del oleaje (θ_p), además de los errores en las mediciones de las corrientes superficiales de AVISO. Se debe analizar además el efecto de la interacción del oleaje con las componentes atmosférica y oceánica.

En general, en esta sección se obtuvo que el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación del oleaje, durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, presenta cambios en el comportamiento de las series temporales de los parámetros escalares: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p). Se obtiene una mejor estimación de las series temporales de los parámetros escalares al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, en comparación con las mediciones de las boyas 42001, 42002, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. El error cuadrático medio (RMSE) de las series temporales de los parámetros escalares disminuye cuando se usa el modelo con interacción ola-corriente, además se presenta un incremento del coeficiente de correlación (R) y una disminución del índice *bias*. Se observa que hay una relación entre el efecto de asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s) y la dirección relativa entre el oleaje y las corrientes (α). A pesar de obtener una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje, las diferencias que se presentan en los índices estadísticos de las series temporales de los parámetros con y sin corrientes, no son significativos, por lo que es importante estudiar el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento espacial de los parámetros escalares, en el comportamiento del espectro de energía ($E(f)$ y $E(f, \theta)$) y los términos fuente y sumidero ($S(f)$).

4.3. Análisis espacial de los parámetros del oleaje: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p).

Esta sección presenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO en la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p), durante condiciones extremas de viento de los huracanes Katrina y Rita. Los resultados de los parámetros escalares del oleaje, tienen una resolución espacial de aproximadamente 18,5 km y una resolución temporal horaria. Las simulaciones con y sin corriente se realizaron teniendo en cuenta el campo de vientos de huracán HURNARR.

4.3.1. Huracán Katrina

La Figura 4-22 presenta la solución espacial del parámetro de altura de ola significativa (H_s) sin tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, con un paso de tiempo de 6 horas, que corresponde a la resolución temporal de los datos que se ingresan al modelo del campo de vientos del huracán Katrina.

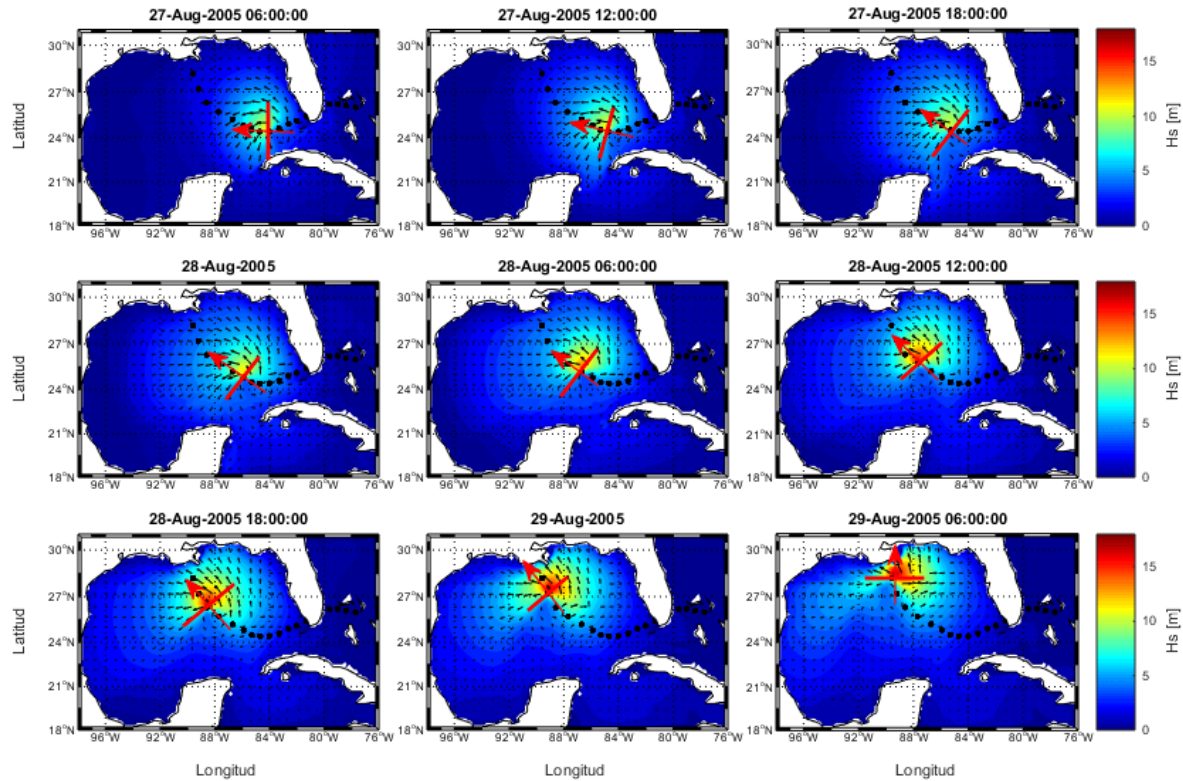


Figura 4-22.: Variación espacial de altura de ola significativa (H_s) sin tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, durante el paso del huracán Katrina. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, con un paso de tiempo de 6 horas. Los vectores indican la dirección del oleaje y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al centro del huracán.

En esta sección, el análisis de la solución espacial de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p) se realiza definiendo cuatro cuadrantes, a partir de la dirección de traslación del huracán y el centro de la tormenta, de la siguiente forma: cuadrante frontal izquierdo (cuadrante I), cuadrante frontal derecho (cuadrante II), cuadrante trasero derecho (cuadrante III) y cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV). En la Figura 4-22, se observa que la magnitud de la altura de ola significativa (H_s), incrementa a medida que el huracán avanza en aguas profundas del Golfo de México. En el momento que el huracán ingresa en aguas profundas (27/08/2005 06:00:00) presenta categoría 2, generando olas que alcanzan alturas de 10 metros. A medida que el huracán avanza en aguas profundas del Golfo de México, incrementa la magnitud del campo de velocidad de vientos, hasta alcanzar la categoría 5 para los instantes de tiempo 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00. En estos instantes el incremento de la magnitud de la velocidad del campo de viento, genera olas de mayor tamaño, alcanzando alturas de ola significativa (H_s) mayores a 15 metros, las cuales se propagan en diferentes direcciones, dependiendo del cuadrante en el que esté ubicado respecto a la dirección de traslación y el ojo del huracán. Luego, el huracán desciende la magnitud de los vientos, hasta llegar a categoría 1 cuando se encuentra en la plataforma continental, en la fecha 29/08/2005 18:00:00. Además, se observa que las olas no siguen el mismo patrón de vientos de huracán, esto se debe al movimiento inducido por la traslación del huracán (Montoya, 2013). Las olas con mayor energía se presentan en la parte derecha del huracán, en el cuadrante frontal derecho (cuadrante II) y el cuadrante trasero derecho (cuadrante III), mientras las olas con menor energía, se presentan en la parte izquierda del huracán, en el cuadrante frontal izquierdo (cuadrante I) y cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV), siendo este último, el cuadrante en el que se presentan las olas con menor energía. La dirección del oleaje en el cuadrante frontal derecho (cuadrante II) y en el cuadrante trasero derecho (cuadrante III) coinciden aproximadamente con la dirección de traslación del huracán, en estos cuadrantes se presentan las olas de mayor tamaño. En el cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV), el oleaje presenta una dirección opuesta a la dirección de traslación del huracán, y corresponde al cuadrante donde se presentan las olas con menor energía. La dirección del oleaje en el cuadrante frontal izquierdo (cuadrante I), es aproximadamente perpendicular a la dirección de traslación del oleaje.

En los resultados obtenidos, los cambios en la magnitud y la dirección del oleaje según el cuadrante del huracán, se deben a la velocidad de traslación del huracán y la asimetría del campo de vientos (Hu & Chen, 2011; Bennett & Mulligan, 2017), y concuerda con los resultados obtenidos por Hu & Chen (2011); Bennett & Mulligan (2017); Montoya et al. (2013) sobre la magnitud y dirección del oleaje, dependiendo del cuadrante del huracán, donde obtienen que el oleaje más energético, se presenta en la parte frontal derecha (cuadrante II) y el oleaje con menor energía se presenta en el cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV). La Figura 4-23 presenta la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) que se obtiene durante el paso del huracán Katrina, considerando el campo de vientos de huracán HURNARR y el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO en la modelación numérica. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, con un paso de tiempo de 6 horas. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define las cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

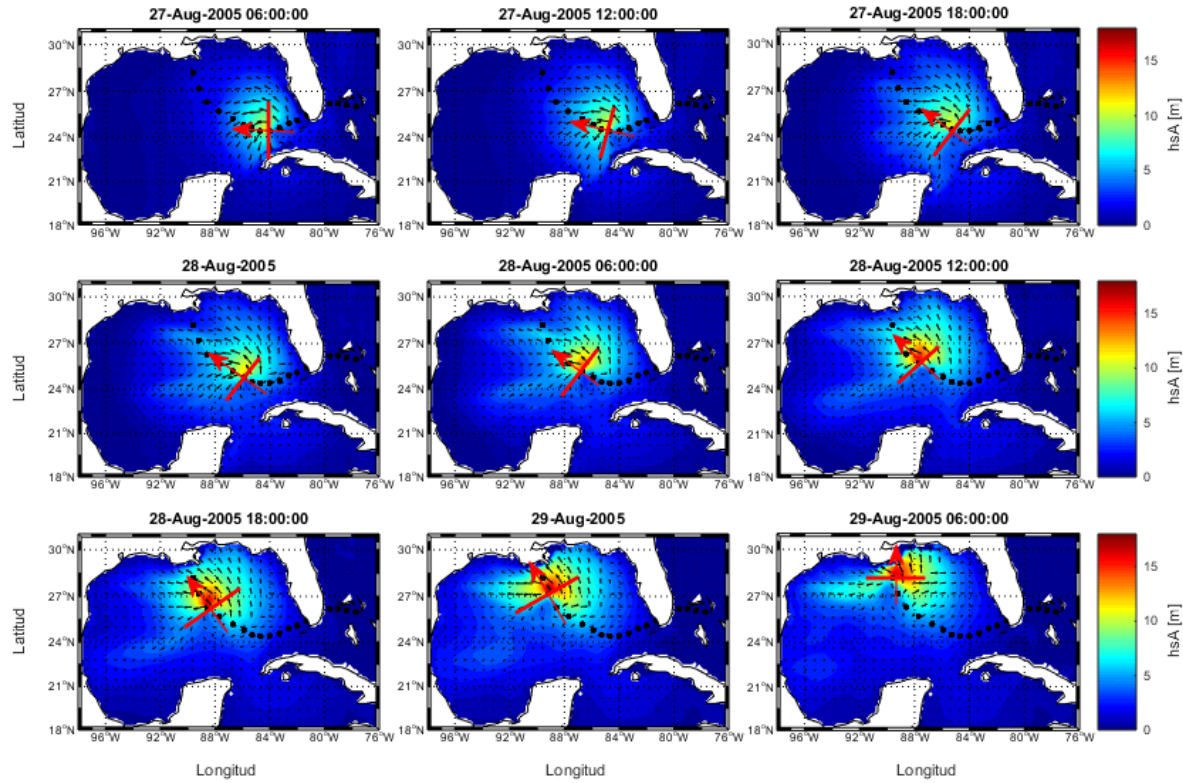


Figura 4-23.: Variación espacial de altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto del campo de velocidad de corrientes superficiales de AVISO. Los datos corresponden al paso del huracán Katrina. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, cada 6 horas. Los vectores indican la dirección del oleaje y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

El efecto de las corrientes superficiales de AVISO, produce una deformación en el patrón espacial del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s). En los instantes de tiempo 27/08/2005 06:00:00, 27/08/2005 12:00:00 y 27/08/2005 18:00:00, se produce un mayor efecto de asomeramiento/disminución de altura de ola significativa (H_s), debido a la presencia del campo de corrientes. Esta deformación incrementa a medida que el huracán avanza en aguas profundas (28/08/2005 00:00:00), incrementando de categoría. A partir de este momento la deformación del patrón espacial es mayor, llevando un patrón similar a medida que el huracán se desplaza hacia aguas más profundas, donde el campo de vientos del huracán alcanza las velocidades máximas, generando olas de mayor tamaño. Esto concuerda con los resultados obtenidos en la sección 4.1, donde las mayores diferencias de magnitud de la altura de ola significativa (H_s) se presentan durante las condiciones extremas de viento de huracán, al considerar el efecto del campo de corrientes en la modelación (ver Figura 4-13). Las mayores variaciones del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s), al considerar el efecto de las corrientes, se presentan en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán. La Figura 4-24 presenta la comparación entre el patrón espacial del parámetro de altura de ola significativa calculado con el campo de vientos HURNARR y sin el campo de corrientes (H_s HURNARR), la solución teniendo en cuenta las corrientes superficiales de AVISO (H_s AVISO), la diferencia de magnitud entre ambas simulaciones (H_s DIF), y el error porcentual (ecuaciones 4-3 y 4-4). Los vectores representan la dirección del oleaje. La comparación de los resultados de las simu-

laciones con y sin corrientes, se realizan para las fechas 28/08/2005 00:00:00 (Huracán Categoría 3), 28/08/2005 06:00:00 (Huracán Categoría 4), y 28/08/2005 12:00:00 (Huracán Categoría 5).

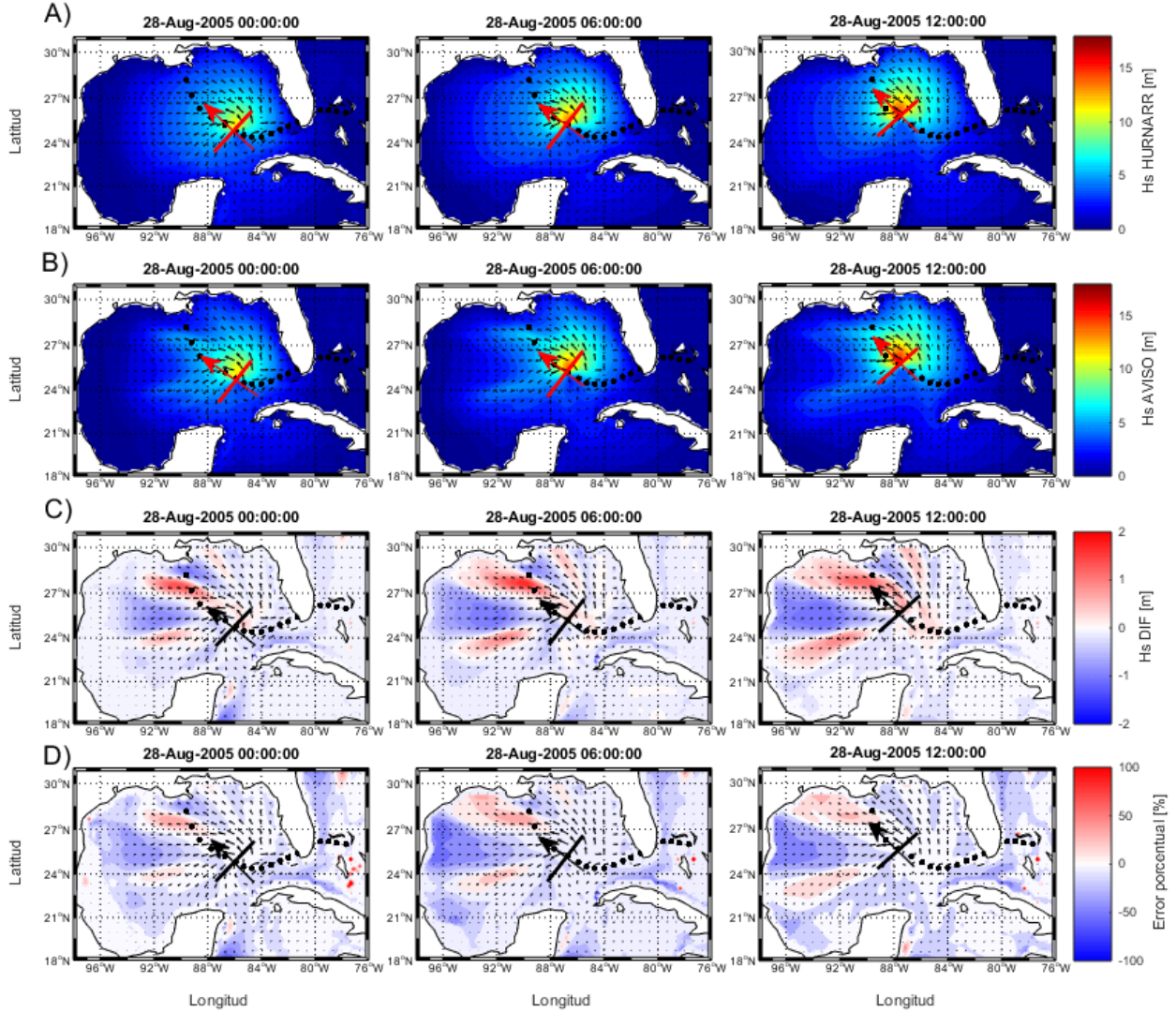


Figura 4-24.: Comparación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral, durante el paso del huracán Katrina. (A) Simulación con vientos de huracán (H_s HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (H_s AVISO), (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (H_s DIF), y (D) Error porcentual de altura de ola significativa (H_s). Los vectores indican la dirección del oleaje y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

En la Figura 4-24 se puede ver que el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación produce variaciones en la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) en todo el dominio de estudio. En las zonas de vientos débiles (lejos del ojo del huracán), las corrientes presentan velocidades que van hasta $0,6 \text{ m/s}$, produciendo cambios en la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s), con diferencias en la magnitud de aproximadamente $0,4$ metros, lo que equivale a diferencias porcentuales que oscilan entre -15% y 15% . Se observa una disminución de la altura de ola

significante (H_s) a lo largo de la corriente de la Florida, en esta región, el oleaje tiene la misma dirección que las corrientes. Las variaciones que se presentan durante condiciones débiles de viento, concuerda con el análisis espacial del efecto de la interacción ola-corriente realizado por Montoya (2013), donde obtiene diferencias porcentuales que van entre -20% y 20% en la solución espacial del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s). Las velocidades máximas del campo de corrientes se presentan durante el paso del huracán Katrina, alcanzando magnitudes de $1,8\text{ m/s}$. En la zona de vientos extremos más cercana al huracán, se observa que al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, se presenta una deformación del patrón espacial, produciendo zonas de asomeramiento y zonas de disminución de la altura de ola significativa (H_s) dependiendo de la dirección relativa entre el oleaje y las corrientes, teniendo en cuenta la dirección de traslación del huracán y la ubicación respecto al centro de la tormenta. En esta región, el incremento de la altura de ola significativa (H_s) llega a alcanzar 1,9 metros, lo que corresponde a una diferencia porcentual de 40% con respecto a la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes. En la zona de vientos extremos más próxima al ojo del huracán las diferencias de la altura de la ola son bajas ($< 5\%$). Las principales diferencias se presentan en las zonas donde hay mayor influencia de las corrientes, generando efectos de asomeramiento/disminución de la altura de la ola. En la zona donde se produce el mayor asomeramiento de la ola, la dirección del oleaje es aproximadamente opuesta a la dirección de las corrientes, creando un efecto de falso fondo, lo que incrementa la altura de ola significativa (H_s). En otras regiones se presenta una disminución de la altura de ola que va hasta 1 metro, lo que corresponde a una diferencia porcentual de -32% . En este caso la dirección del las corrientes y del oleaje van aproximadamente en el mismo sentido. Este comportamiento de la altura de ola significativa (H_s) también se observó en la comparación de las series temporales de los parámetros escalares en la sección 4.2, donde en condiciones de vientos débiles, el efecto de las corrientes no presenta un cambio significativo en la magnitud de la altura de ola, mientras en condiciones extremas de huracán, el efecto de las corrientes genera un incremento en la altura de ola de aproximadamente 1,4 metros, en comparación con la solución que se obtiene sin considerar el campo de corrientes. (ver Figura 4-13).

En general, se presentan diferencias que oscilan entre -2 y $1,6$ metros, con diferencias porcentuales que varían entre -40% y 32% dependiendo de la ubicación respecto a la dirección de traslación y el ojo del huracán, y de la dirección relativa entre las corrientes y el oleaje ($\theta_c - \theta_w$). La deformación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s) que se produce al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, se observa también en la investigación realizada por Olabarrieta et al. (2012), donde realizan simulaciones teniendo en cuenta el campo de corrientes durante el paso del huracán Ida, por el Golfo de México, en los resultados que obtiene de la altura de ola significativa (H_s), se observa que los contornos que representan igual magnitud no presentan un comportamiento redondeado, en comparación con la solución espacial sin tener en cuenta el campo de corrientes. Samiksha et al. (2017) cuantifica la diferencia de la altura de ola significativa (H_s) durante el paso de un ciclón, cerca a la plataforma continental, obteniendo diferencias en la distribución espacial de la altura de ola significativa (H_s) de hasta 0,3 metros, al tener en cuenta el campo de corrientes en la modelación numérica.

La Figura 4-25 presenta la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) y el campo de corrientes superficiales de AVISO (izquierda), y la diferencia entre las simulaciones con y sin corrientes (derecha). Además, se presenta la dirección de las corrientes superficiales de AVISO (vectores negros), y la trayectoria del huracán Katrina (puntos negros). La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. El recuadro amarillo resalta la zona donde se produce el mayor asomeramiento de la altura de ola significativa (H_s), y el recuadro rojo la zona donde se produce una mayor disminución.

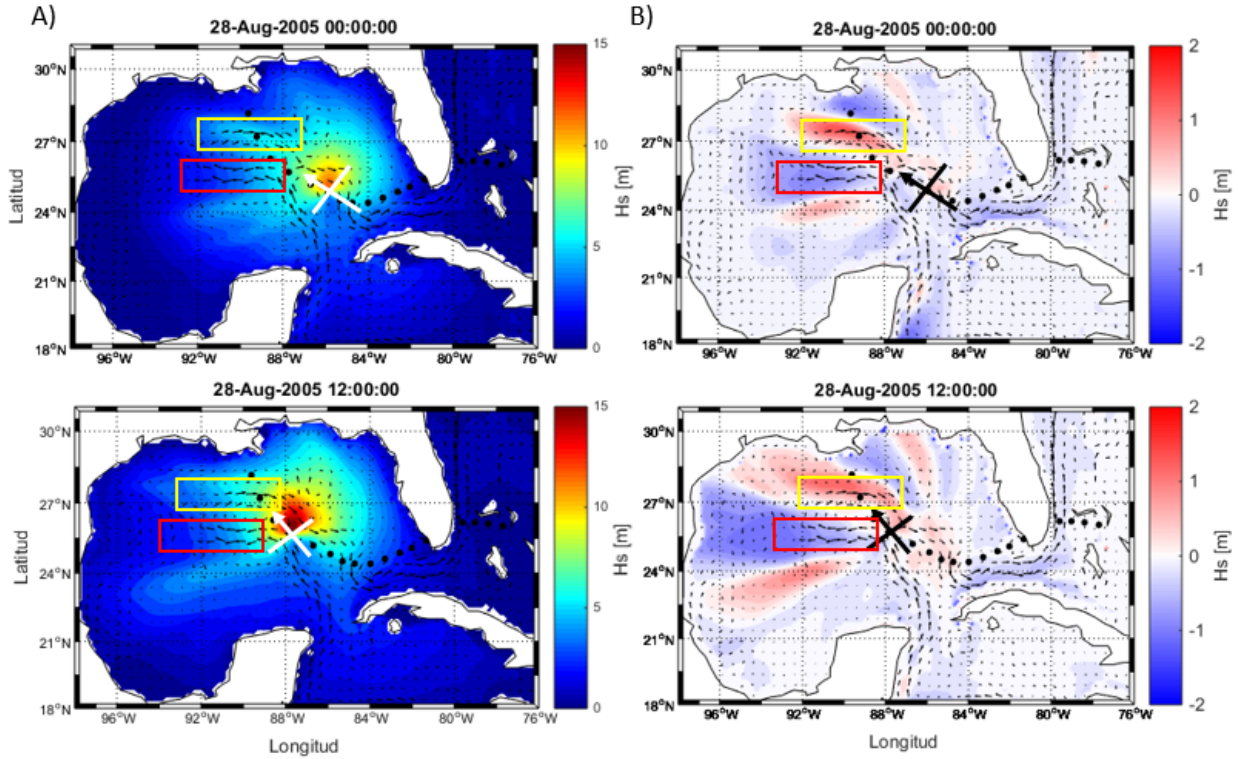


Figura 4-25.: Comparación de la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, durante el paso del huracán Katrina. (A) Patrón espacial de altura de ola significativa (H_s AVISO) y datos del campo de corrientes de AVISO. (B) Diferencias de altura de ola significativa (H_s) al incluir el campo de corriente y los datos del campo de corrientes. Los vectores indican la dirección de las corrientes y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

El efecto de la interacción ola-corriente presenta mayores diferencias en la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II), donde la magnitud de las corrientes superficiales es mayor, presentando mayores diferencias en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán. En estos cuadrantes se presentan diferencias entre -2 y 2 metros de altura de ola significativa (H_s), y errores porcentuales entre -40% y 40% , en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes. En los instantes de tiempo analizados, el oleaje en la parte frontal izquierda (cuadrante I) va en dirección *Oeste*, y al tener en cuenta el efecto de las corrientes, se observa que las corrientes que van en dirección *Este* producen un asomeramiento de la altura de ola significativa (recuadro amarillo), y las corrientes que van en dirección *Oeste* una disminución de la altura (recuadro rojo). Las menores diferencias de altura de ola significativa (H_s)

al incluir las corrientes, se presentan en la parte trasera del huracán (cuadrantes III y IV), con diferencias que oscilan entre $-0,4$ y $0,4$ metros, lo que corresponde a errores porcentuales entre -10% y 10% . En la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV), se presenta una disminución de la altura de ola significativa (H_s) al incluir el campo de corrientes. En este cuadrante la dirección del oleaje va en sentido opuesto a la dirección de traslación del huracán, lo que se debe a la asimetría del campo de vientos. En general, se observa que al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en la simulación, hay una variación significativa de la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) en toda la zona de estudio, presentando regiones donde las diferencias porcentuales alcanzan valores que van hasta 40% , lo cual es una variación importante, en la estimación de este parámetro escalar.

La Figura 4-26 presenta la distribución espacial del periodo pico (T_p) calculado con el modelo de oleaje (WWIII) incluyendo el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Katrina. Además, se presenta la trayectoria del huracán (puntos negros). La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define las cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

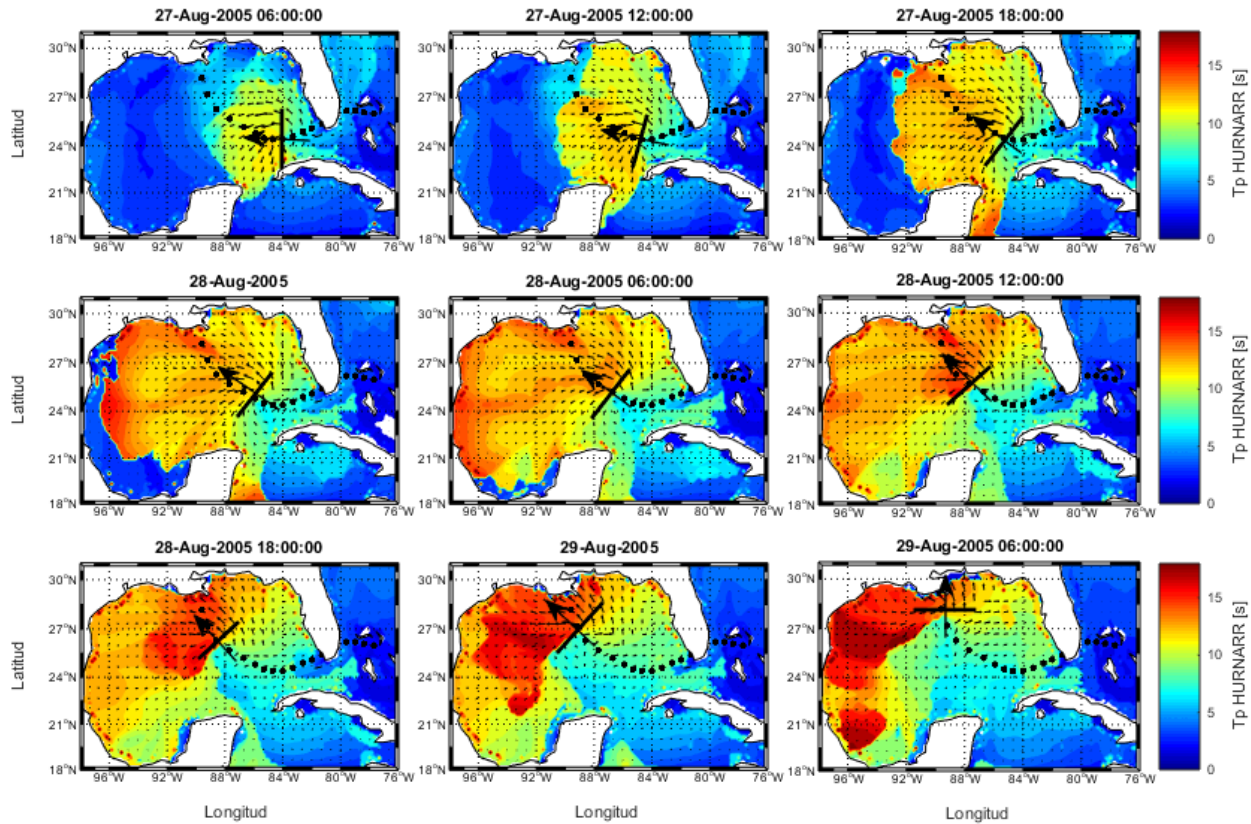


Figura 4-26.: Solución espacial del parámetro de periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto del campo de velocidad de corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Katrina. Los instantes de tiempo corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, cada 6 horas. Los vectores indican la dirección de las corrientes y los puntos negros la trayectoria del huracán. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

En la Figura 4-26 en los primeros instantes del huracán en el Golfo de México (27/08/2005 06:00:00, 27/08/2005 12:00:00 y 27/08/2005 18:00:00) en la parte frontal del huracán se produce un incremento de la magnitud del periodo pico (T_p) del oleaje, el cual se propaga por todo el Golfo de México a medida que el huracán continua en su trayectoria. En el instante de tiempo 28/08/2005 12:00:00, el huracán alcanza su máxima categoría, produciendo un incremento del periodo pico (T_p), en todo el Golfo de México, a partir de este instante se presentan los valores máximos del periodo pico (T_p), que van hasta aproximadamente 22 segundos. El huracán continua en categoría 5 en los dos instantes siguientes (28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00) generando oleaje de mayor periodo pico (T_p), el cual se propaga en dirección Noroeste. A partir de este instante el huracán se aproxima a la plataforma continental, disminuyendo a categoría 1 en la fecha 29/08/2005 18:00:00. Luego, el oleaje que se presenta en el Golfo de México comienza a disminuir el periodo pico (T_p) en el todo dominio de estudio. La magnitud del periodo pico (T_p), depende de la ubicación respecto al centro de la tormenta y a la dirección de traslación del huracán, presentando un mayor incremento en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II), mientras en la parte trasera del huracán (cuadrantes III y IV) se presenta un incremento de menor magnitud. Las olas de mayor periodo, que se presentan en la parte frontal del huracán, viajan en diferentes direcciones hasta la plataforma continental, disminuyendo de nuevo el periodo pico (T_p) en el dominio de estudio. Este comportamiento se debe a la asimetría del campo de vientos del huracán y la energía del oleaje, dependiendo de la posición relativa, respecto al centro de la tormenta y a la dirección de traslación.

La Figura 4-27 presenta la comparación entre el patrón espacial del parámetro escalar periodo pico (T_p), durante el huracán Katrina, calculado con el campo de vientos HURNARR y sin el campo de corrientes (T_p HURNARR), la solución teniendo en cuenta las corrientes superficiales de AVISO (T_p AVISO), la diferencia entre ambas simulaciones (T_p DIF), y el error porcentual (ecuaciones 4-3 y 4-4). Además, las gráficas presentan los vectores que corresponden a la dirección pico del oleaje (θ_p). La comparación de los resultados de las simulaciones con y sin corrientes, se realiza para las fechas 27/08/2005 18:00:00 (Huracán Categoría 3), 28/08/2005 00:00:00 (Huracán Categoría 3), y 28/08/2005 06:00:00 (Huracán Categoría 4).

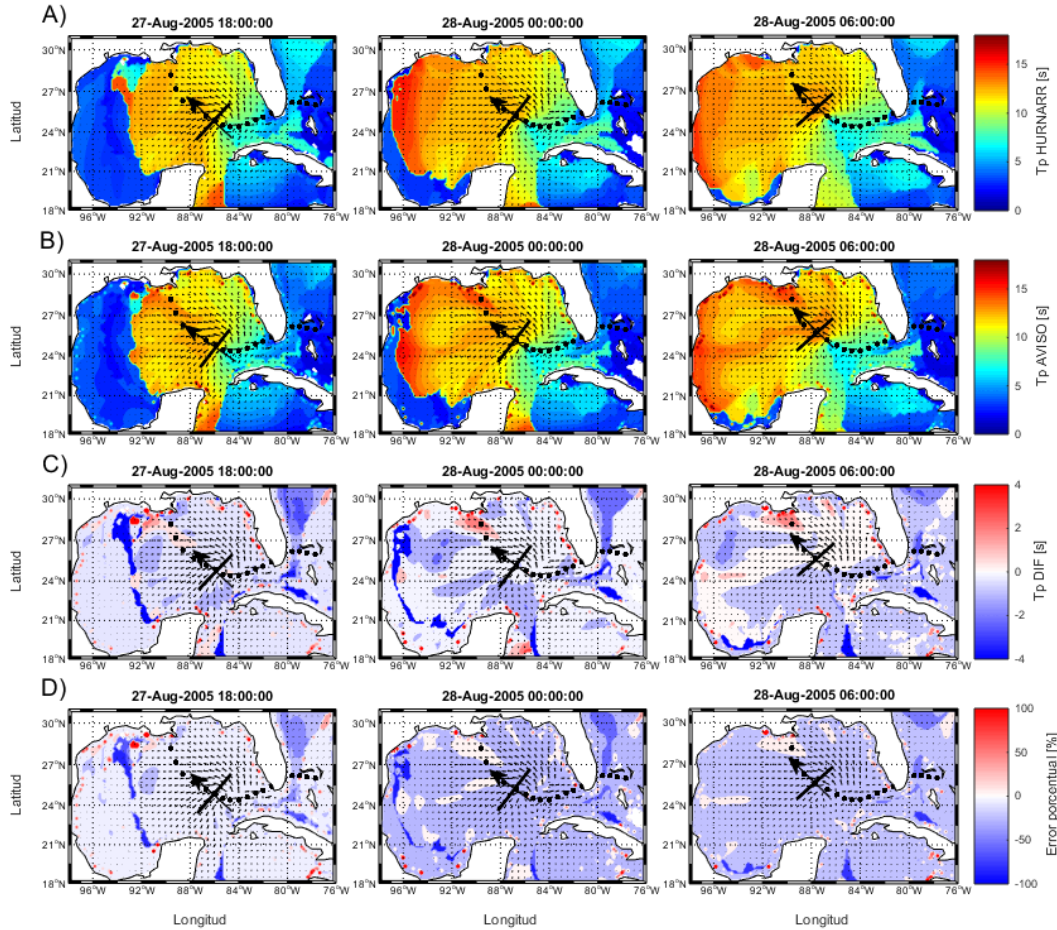


Figura 4-27.: Comparación del patrón espacial del periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral. (A) Simulación con vientos de huracán y sin corrientes (T_p HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (T_p AVISO) (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (T_p DIF). (D) Error porcentual del periodo pico (T_p). Los vectores indican la dirección de las corrientes y los puntos negros la trayectoria del huracán Katrina. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

El efecto del campo de corrientes presenta cambios del periodo pico (T_p) del oleaje, en todo el dominio del estudio. Las diferencias en magnitud oscilan entre -3 y 3 segundos, lo que corresponde a diferencias porcentuales que varían entre -40% y 40% , con valores pico que van hasta los -90% y 80% . Las mayores diferencias de magnitud y del error porcentual se presentan hacia el Noroeste del Golfo de México y a lo largo de la corriente de la Florida. En estas zonas los valores de periodo para ambas simulaciones presentan valores relativamente bajos que oscilan entre 2 y 5 segundos, sin embargo las diferencias porcentuales son significativas con valores entre -40% y 50% . Hacia las zonas mas energéticas en cercanía al ojo del huracán se observan diferencias en la magnitud entre -1 y $0,5$ segundos, lo que corresponde a un error porcentual que varía entre -20% y 10% . A diferencia de la altura de ola significativa (H_s), hay zonas que corresponden a magnitudes de condiciones débiles de viento, donde el efecto de la interacción ola-corriente presenta cambios significativos en la estimación del periodo pico (T_p), lo que concuerda con la comparación de las series temporales teniendo en cuenta el campo de corrientes (ver Figura 4-13).

4.3.2. Huracán Rita

Similarmente, se presenta la solución espacial de los parámetros escalares del oleaje durante el paso del huracán Rita. La Figura 4-28 presenta la comparación entre el patrón espacial del parámetro de altura de ola significativa (H_s) calculado con el campo de vientos HURNARR y sin corrientes (H_s HURNARR) y la solución incluyendo las corrientes superficiales de AVISO (H_s AVISO), además, se presenta la diferencia entre ambas simulaciones (H_s DIF), y el error porcentual (ecuaciones 4-3 y 4-4). Los vectores indican la dirección del oleaje. La comparación de los resultados de las simulaciones con y sin corrientes, se realiza para las fechas 22/09/2005 06:00:00 (Huracán Categoría 5), 22/09/2005 12:00:00 (Huracán Categoría 5), 22/09/2005 18:00:00 (Huracán Categoría 4).

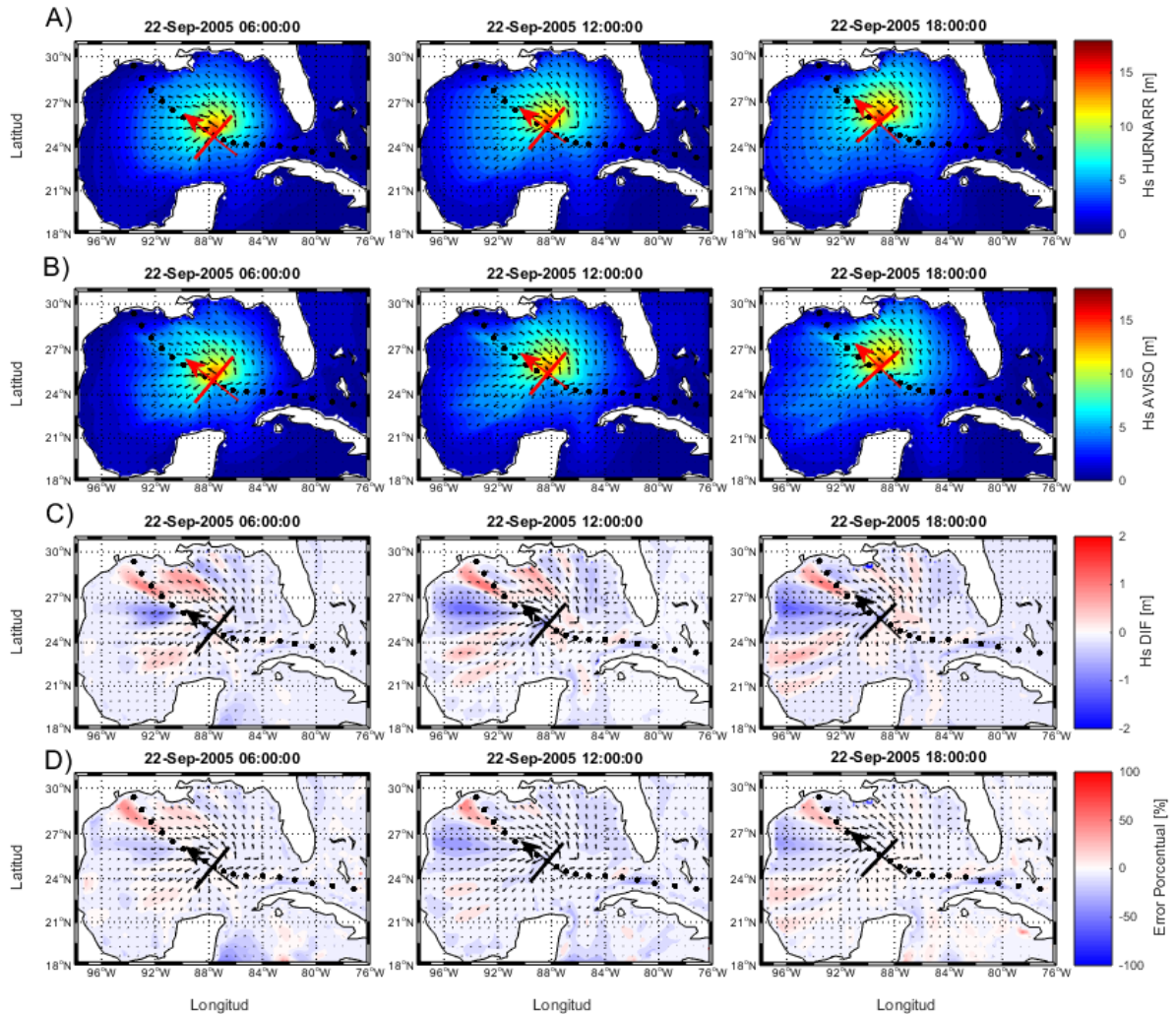


Figura 4-28.: Comparación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral, durante el paso del huracán Rita. (A) Simulación con vientos de huracán (HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (AVISO) (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (H_s DIF). (D) Error porcentual de altura de ola significativa (H_s). Los vectores indican la dirección del oleaje. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

En el caso del huracán Rita, el efecto de las corrientes superficiales de AVISO produce una deformación del patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s), pero de menor magnitud en comparación con el huracán Katrina. En la Figura 4-28 se observa que al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la simulación, se presentan cambios de la altura de ola significativa (H_s) en todo el dominio. La solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) en las zonas de vientos débiles, presenta diferencias de aproximadamente 0,3 metros, lo que equivale a diferencias porcentuales que oscilan entre -10% y 10% . Las corrientes en esta zona, presentan velocidades que van hasta los $0,6\text{ m/s}$. Las variaciones que se presentan durante condiciones débiles de viento, concuerda con el análisis espacial del efecto de la interacción ola-corriente realizado por Montoya (2013).

Las velocidades máximas del campo de corrientes se presentan en las aguas más profundas del Golfo de México, alcanzando magnitudes de $1,5\text{ m/s}$. Las máximas diferencias se presentan en las zonas donde la velocidad de las corrientes es mayor. En la zona de vientos extremos más cercana al huracán, se presenta una deformación del patrón espacial, produciendo zonas de asomeramiento y zonas de disminución de la altura de ola significativa (H_s). La dirección relativa entre las corrientes y el oleaje producen zonas donde el incremento de la altura de ola significativa (H_s) alcanza valores de 1,3 metros, lo que corresponde a una diferencia porcentual de 35% con respecto a la magnitud que se obtiene con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes. En la zona de vientos extremos más próxima al ojo del huracán las diferencias de la altura de la ola son bajas ($< 5\%$). Este comportamiento de la altura de ola significativa (H_s) también se observó en la comparación de las series temporales de los parámetros escalares (ver Figura 4-19), donde en condiciones débiles de viento, el efecto de las corrientes no presenta un cambio significativo en la magnitud de la altura de ola, mientras en condiciones extremas de huracán, el efecto de las corrientes genera una variación de hasta aproximadamente 1 metro en la altura de ola significativa (H_s). En general en todo el dominio, se presentan diferencias que oscilan entre $-1,2$ y $1,4$ metros, con diferencias porcentuales que varían entre -25% y 26% dependiendo de la ubicación del huracán, y de la dirección entre las corrientes y el oleaje.

La Figura 4-29 presenta la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) y el campo de velocidad de corrientes de AVISO (izquierda), y la diferencia entre ambas simulaciones (derecha). Los vectores representan la dirección y magnitud del campo de corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Rita. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán. El recuadro amarillo resalta la zona donde se produce el mayor asomeramiento de la altura de ola significativa (H_s), y el recuadro rojo la zona donde se produce una mayor disminución.

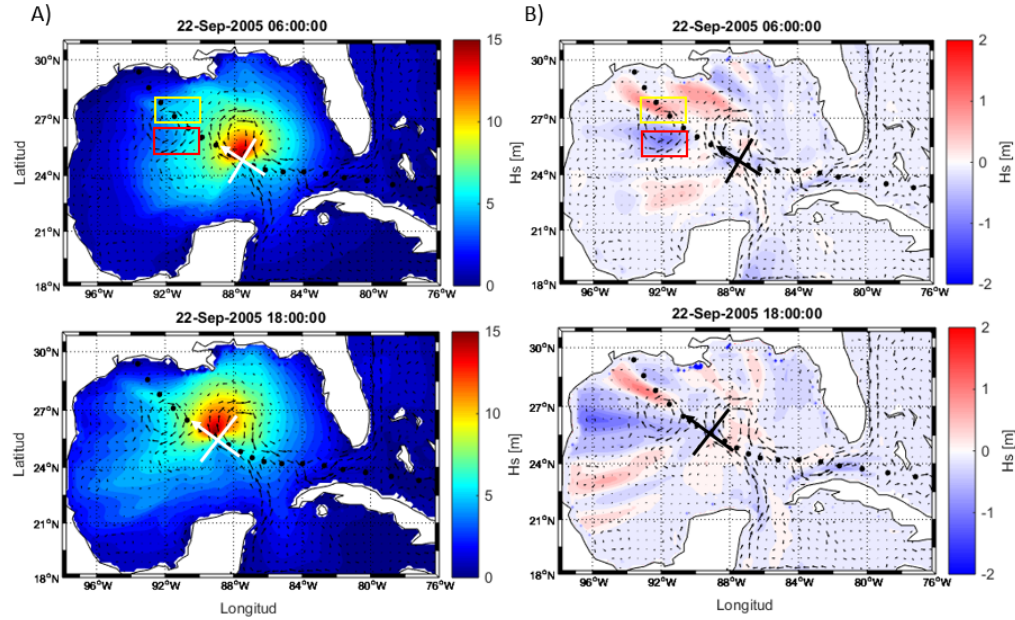


Figura 4-29.: Comparación de la solución espacial de la altura de ola significativa (H_s) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, durante el paso del huracán Rita. (A) Patrón espacial de altura de ola significativa (H_s AVISO) y datos del campo de corrientes de AVISO (Vectores). (B) Diferencias de altura de ola significativa (H_s) al incluir el campo de corriente y los datos del campo de corrientes. La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

El campo de corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Rita, presenta dos remolinos en aguas profundas con velocidades de aproximadamente 1 m/s. La diferencia en el comportamiento espacial de las corrientes se debe al paso del huracán Katrina. Inicialmente se presenta un remolino en aguas profundas del Golfo de México, y con el paso del huracán Katrina se generan dos remolinos, con velocidades de menor magnitud, los cuales se derivan hacia el oeste del Golfo perdiendo lentamente la energía. En el caso del huracán Rita, el efecto de las corrientes presenta mayores diferencias de la altura de ola significativa (H_s) en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II), donde la magnitud de las corrientes superficiales es mayor. En estos cuadrantes se presentan diferencias entre -1,2 y 1 metros de altura de ola significativa (H_s), y errores porcentuales entre -25 % y 20 %, en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes. Las menores diferencias de altura de ola significativa (H_s) al incluir las corrientes, se presentan en la parte trasera del huracán (cuadrantes III y IV), con diferencias que oscilan entre -0,3 y 0,2 metros, lo que corresponde a errores porcentuales entre -10 % y 8 %. En general, se observa que al incluir el efecto de las corrientes superficiales, se presenta una variación de la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) en todo el dominio, presentando regiones donde las diferencias porcentuales alcanzan valores que van hasta 30 %, lo cual es una variación importante, en la estimación de este parámetro escalar. Las diferencias que se presentan en la altura de ola significativa (H_s) durante el paso del huracán Rita, son de menor magnitud, en comparación con la simulación del huracán Katrina.

La Figura 4-30 presenta el patrón espacial del parámetro de periodo pico (T_p), durante el huracán Rita, calculado con el campo de vientos HURNARR y sin el campo de corrientes (T_p HURNARR), la solución teniendo en cuenta las corrientes superficiales de AVISO (T_p AVISO), la diferencia entre ambas simulaciones (T_p DIF), y el error porcentual (ecuaciones 4-3 y 4-4). Además, las gráficas presentan los vectores que corresponden a la dirección pico del oleaje (θ_p). La flecha indica la dirección de traslación del huracán, y define los cuatro cuadrantes con respecto al ojo del huracán.

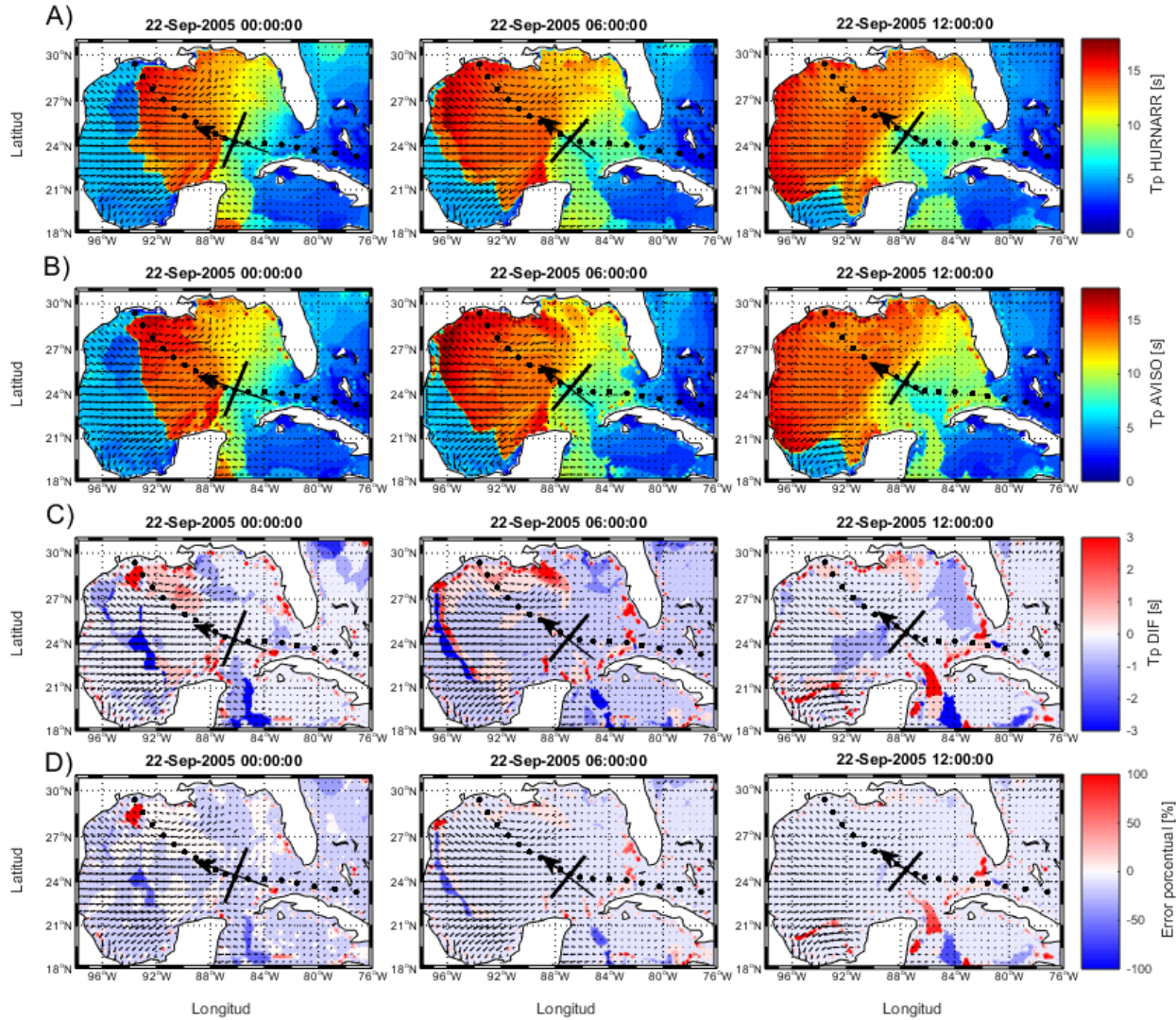


Figura 4-30.: Comparación del patrón espacial del periodo pico (T_p) teniendo en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral. (A) Simulación con vientos de huracán (T_p HURNARR), (B) Simulación con vientos de huracán HURNARR y corrientes superficiales de AVISO (T_p AVISO) (C) Diferencia de los resultados obtenidos entre ambas simulaciones (T_p DIF). (D) Error porcentual del periodo pico (T_p). Los vectores indican la dirección del oleaje. Huracán Rita.

En el caso del huracán Rita, la simulación que tiene en cuenta el campo de corrientes de AVISO, presenta cambios del periodo pico (T_p) que oscilan entre -3 y 3 segundos, presentando valores picos que van hasta -8 y $8,5$ segundos, las diferencias porcentuales varían entre -30% y 30% en

todo el dominio, aunque se presentan valores pico que van hasta los -80% y 90% . Al igual que el caso del huracán Katrina, las mayores diferencias de magnitud y del error porcentual se presentan hacia el Noroeste del Golfo de México y a lo largo del la corriente de la Florida. En estas zonas los valores de periodo pico (T_p) para ambas simulaciones presentan valores relativamente bajos que oscilan entre 2 y 4 segundos. Sin embargo, las diferencias porcentuales son significativas con valores entre -40% y 50% . Hacia las zonas mas energéticas en cercanías del ojo del huracán se observan diferencias en la magnitud entre -1 y $0,5$ segundos, lo que corresponde a un error porcentual que varía entre -20% y 10% . Al comparar los resultados de ambas simulaciones, se observa que al tener en cuenta la interacción ola-corriente en la modelación espectral, los cambios que se presentan cerca al huracán presentan diferencias de hasta $0,7$ segundos, a mayor distancia del huracán, se ven las mayores diferencias de periodo pico (T_p) al incluir el efecto del campo de corrientes.

En general, en este capítulo se obtiene que el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje, presenta cambios en el comportamiento de las series temporales y la distribución espacial de los parámetros escalares: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p). En la sección 4.2, se obtiene una mejor estimación de las series temporales de los parámetros escalares al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, en comparación con las mediciones de las boyas 42001, 42002, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. El error cuadrático medio (RMSE) de las series temporales de los parámetros escalares disminuyen cuando se usa el modelo con interacción ola-corriente. Reducciones del RMSE entre el 3% y el 20% para los huracanes Katrina y Rita comprueban el aumento en la precisión usando el método. Adicionalmente, se encontró que la interacción ola-corriente tiene un mayor efecto en la magnitud de la altura de ola durante condiciones extremas de viento de huracán en comparación con los resultados obtenidos en condiciones débiles de viento, aunque las mayores diferencias porcentuales se presentan, días antes del paso de los huracanes. La solución espacial de los parámetros escalares del oleaje, presentan errores porcentuales de altura de ola significativa (H_s) que oscilan entre -15% y 15% , durante el paso del huracán Katrina, y entre -10% y -10% en el caso del huracán Rita, en condiciones débiles de viento. Esto concuerda con las diferencias porcentuales que obtiene Montoya (2013) en el análisis de los parámetros del oleaje, durante condiciones débiles de viento. En condiciones extremas se presentan errores porcentuales que varían entre -40% y 32% , en el caso del huracán Katrina y errores porcentuales entre -25% y 26% , durante el paso del huracán Rita.

A pesar de tener un mayor gasto computacional al considerar los datos del campo de velocidad de corrientes superficiales de AVISO en la modelación, se presenta una mejor estimación de las series temporales de los parámetros escalares: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p), en comparación con las mediciones de las boyas de la NOAA. Sin embargo, las diferencias que se presentan en los índices estadísticos de las series temporales de los parámetros con y sin corrientes, no son significativas, por lo que es importante estudiar el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro de frecuencias ($E(f)$) y el espectro direccional de energía $E(f, \theta)$.

5. Efecto de la interacción ola-corriente en los espectros de energía del oleaje en condiciones extremas de Huracán

En el capítulo 4 se obtuvo que el efecto de la interacción ola-corriente presenta una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p), en comparación con las mediciones de las boyas de la NOAA. Sin embargo, las diferencias que se presentan en la magnitud de los parámetros escalares pueden ser engañosos, ya que la mejoría señalada por los índices estadísticos no son significativos.

La necesidad de obtener una mayor precisión en las simulaciones para efectos prácticos ha resultado en el desarrollo de métodos que emplean el espectro completo de energía, es decir, teniendo en cuenta los espectros de energía de oleaje $E(f)$ y también el carácter vectorial del oleaje. Cada vez más son las aplicaciones en las cuales se requiere del conocimiento del espectro direccional de energía $E(f, \theta)$ del oleaje para obtener resultados computacionales más precisos (Krishnakumar et al., 2010; Adamo et al., 2014; Elshinnawy et al., 2018; Petersen et al., 2019; Altomare et al., 2020; Skandali et al., 2020). El espectro direccional de energía describe el fenómeno complejo de las olas generadas por el viento en términos de contribuciones de ondas que se propagan en diferentes direcciones con diferentes frecuencias. Estudiar el comportamiento y las variaciones espaciales y temporales del espectro direccional es importante para una mayor precisión en aplicaciones de ingeniería que basados solo en los parámetros escalares como la altura de la ola significativa (H_s), el período pico (T_p) y la dirección pico del oleaje (θ_p) corren el riesgo de obtener errores significativos.

En este capítulo se estudia el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias, $E(f)$, y el espectro direccional de energía, $E(f, \theta)$. Además, se estudia el comportamiento de los espectros de energía en los cuatro cuadrantes del huracán, según la ubicación respecto a la dirección de traslación y el ojo del huracán, para los instantes de tiempo que el huracán presenta mayor energía. Se presentan los resultados obtenidos del efecto de las corrientes, en el comportamiento de los términos fuente y sumidero $S(f)$, los cuales representan los procesos físicos en la interacción del oleaje con las componentes atmosférica y oceánica.

5.1. Espectro escalar de frecuencias

Esta sección presenta los efectos de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de energía de frecuencias $E(f)$ durante el paso de los huracanes Katrina y Rita. Los resultados obtenidos con la modelación espectral fueron validados con la información disponible de las boyas 42001, 42036, 42038, y 42040 de la NOAA, ubicadas en el Golfo de México.

La Figura 5-1 presenta la ubicación de las boyas de las NOAA (puntos verdes y contorno negro) empleadas para validar los resultados obtenidos con las simulaciones del espectro escalar de frecuencias. Además se presenta la trayectoria de los huracanes Katrina y Rita, usando la convención de colores de la NOAA, para indicar la categoría, según la escala de vientos de huracán de Saffir-Simpson. Los colores representan la categoría del huracán de la siguiente forma: Tormenta tropical (ST-Verde), Huracán categoría 1 (H1-Amarillo), categoría 2 (H2-Naranja), categoría 3 (H3-Rojo), categoría 4 (H4-Rosado), y categoría 5 (H5-Morado). Los instantes de tiempo en los que se presentan los resultados de la modelación del espectro escalar de frecuencias, corresponden a las fechas 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, cada 6 horas, en el caso del huracán Katrina. En este periodo de tiempo el huracán se encuentra entre las categorías 2 y 5. En el caso del huracán Rita, se analiza los resultados para las fechas 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, durante este periodo el huracán desciende desde la categoría 5 hasta la categoría 1. Los resultados son comparados con las boyas 42001 y 42038 durante el huracán Katrina, y las boyas 42002 y 42040, durante el huracán Rita.

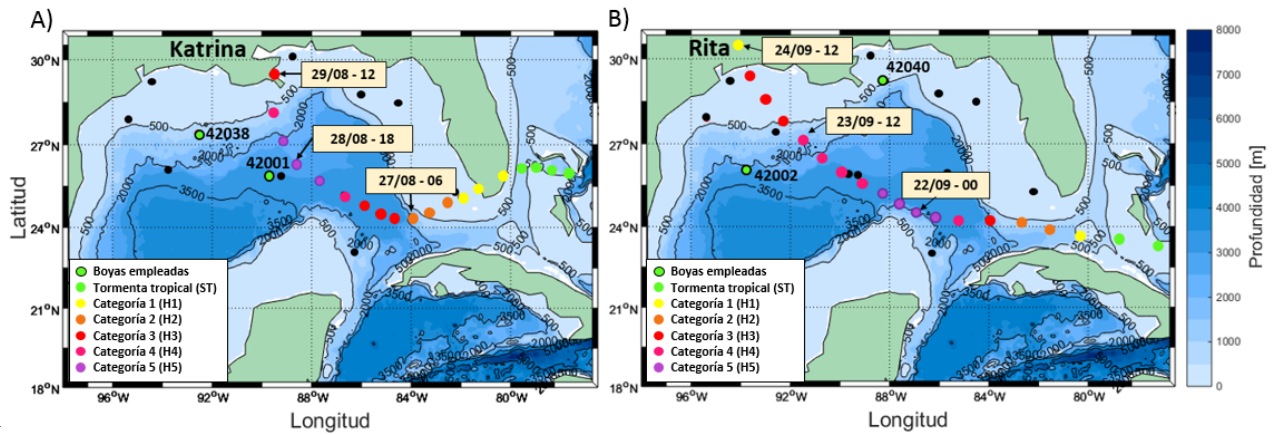


Figura 5-1.: Ubicación de las boyas de la NOAA y trayectoria de los huracanes, para el análisis del espectro escalar de frecuencias. (A) Ubicación de las boyas 42001 y 42038, y categorías del huracán Katrina. (B) Ubicación de las boyas 42002 y 42040, y categorías del huracán Rita. Los instantes de tiempo en los que se presentan los resultados de la modelación del espectro escalar de frecuencias, corresponden a las fechas 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, cada 6 horas, en el caso del huracán Katrina. En el caso del huracán Rita, se analiza los resultados para las fechas 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00.

5.1.1. Huracán Katrina

La Figura 5-2 presenta el efecto de la interacción ola-corriente en el espectro escalar de energía de frecuencias $E(f)$ calculado con el modelo de oleaje WAVEWATCH III[®] (WWIII) (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019), teniendo en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Katrina. Además, presenta la magnitud de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s , en metros) y periodo pico (T_p , en segundos), calculados con los espectro modelados con y sin corrientes. Los parámetros escalares (H_s, T_p) y espectros de frecuencias ($E(f)$) son comparados con las mediciones realizadas por la boya 42001 de la NOAA (ver Figura 5-1). Además se presenta el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y la categoría del huracán, para el periodo 27/08/2005 06:00:00 hasta 08/08/2005 06:00:00, cada 6 horas.

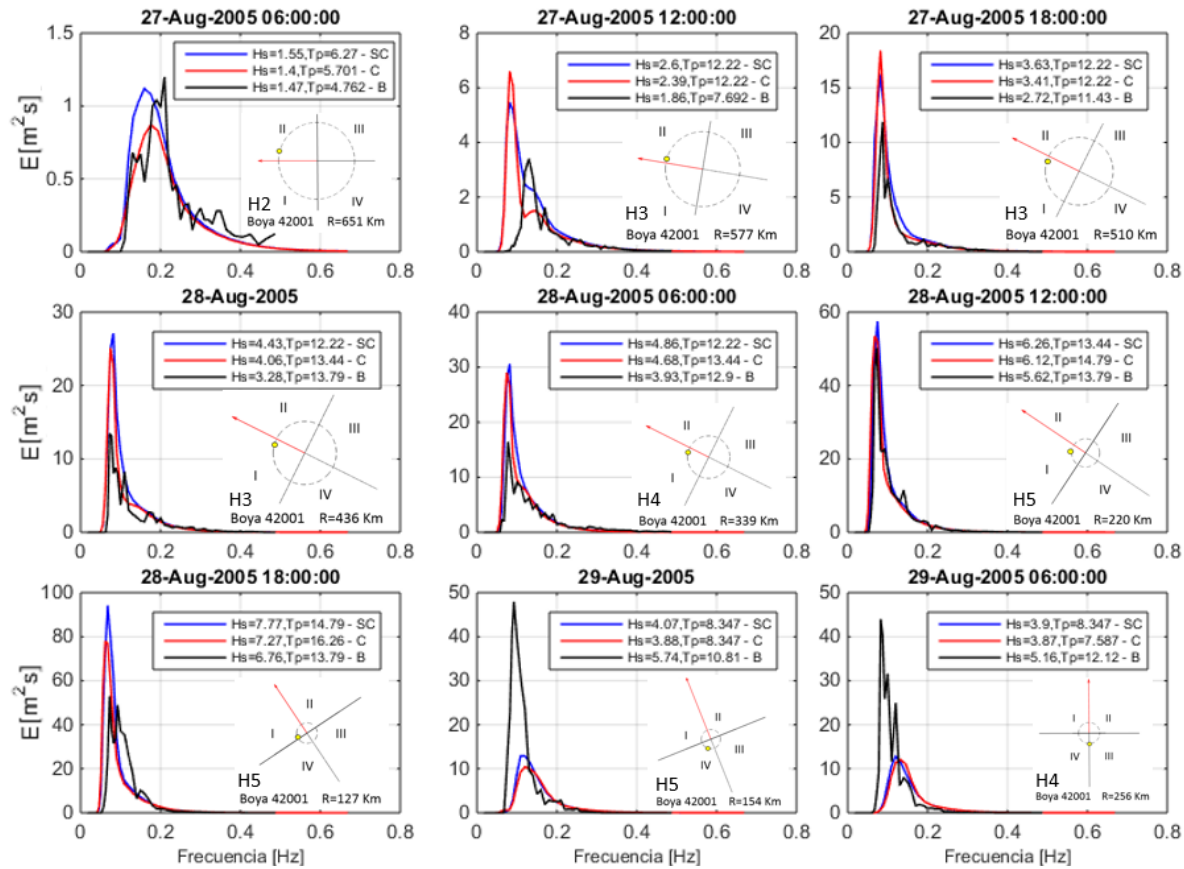


Figura 5-2.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, cada 6 horas. Los espectros corresponden al paso del Huracán Katrina. SC corresponde a la solución obtenida de los espectros escalares de frecuencia que no tienen en cuenta el campo de corrientes; C corresponde a las simulaciones que incluyen el campo de corrientes y B son los datos medidos por las boyas de la NOAA de los espectros escalares de energía. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos.

De las Figuras 5-1 y 5-2 se observa que al ingresar el huracán Katrina en aguas profundas (27/08/2005 06:00:00 y 27/08/2005 12:00:00), la boya 42001 se encuentra en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante II), a distancias de 651 y 577 kilómetros, respectivamente. En estos instantes de tiempo, el huracán presenta categoría 2 y 3, respectivamente, y se observa que la energía se distribuye en un rango de frecuencias entre 0,042 Hz y 0,4 Hz y la frecuencia pico está alrededor de 0,2 Hz . Además, se observa que la simulación que tiene en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente presenta una mejor estimación de la altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) en comparación con los parámetros medidos por la boya, a pesar de no representar adecuadamente los valores máximos de energía.

A medida que el huracán avanza en aguas profundas, incrementando de categoría y disminuyendo la distancia con respecto a la boya 42001 (27/08/2005 18:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00), la energía del huracán se concentra en las bajas frecuencias ($f < 0,15$ Hz) y la frecuencia pico está alrededor de 0,1 Hz . En estos instantes la boya se encuentra ubicada en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán, donde las simulaciones numéricas con y sin corrientes sobrestiman la magnitud de la energía en comparación con los espectros medidos, obteniendo una estimación más cercana de los parámetros escalares del oleaje cuando se tiene en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente. La fecha 28/08/2005 18:00:00, corresponde al instante de tiempo en el cual el huracán alcanza la máxima categoría (5) y se encuentra más cerca de la boya (127 kilómetros), presenta los máximos valores de energía y un sistema de oleaje tipo *swell* muy energético. A partir de este instante, la categoría del huracán empieza a descender en las fechas 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 06:00:00, distanciándose de la boya, la cual se ubica en la parte trasera izquierda de éste (Cuadrante IV). En este cuadrante, la energía se redistribuye hacia un rango de frecuencias más altas (ver 29/08/2005 06:00:00) alcanzando nuevamente la categoría 4. Estos resultados concuerdan con el análisis realizado por (Hu & Chen, 2011; Montoya et al., 2013; Bennett & Mulligan, 2017) sobre el comportamiento del espectro direccional de energía según el cuadrante en el que se ubique con respecto al centro de la tormenta y la dirección de traslación, el cual cambia debido a la asimetría del campo de vientos del huracán.

La magnitud de la energía y la distribución de los espectros de frecuencias concuerda con los valores reportados en investigaciones realizadas durante el paso de huracanes en el Golfo de México (Montoya et al., 2013; Bennett & Mulligan, 2017), donde los modelos numéricos sobrestiman y subestiman la magnitud del valor máximo de energía, en comparación con las mediciones de los espectros escalares realizados por la NOAA. En la mayoría de instantes de tiempo estudiados, al incluir el efecto de la interacción ola-corriente se presenta una disminución de los valores máximos de energía, presentando un mejor ajuste a las mediciones realizadas por la NOAA. A partir del espectro escalar de frecuencias se estima el valor de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p). En la mayoría de los instantes, cuando se considera el efecto de las corrientes durante el paso del huracán Katrina, se obtiene una mejor estimación del parámetro de altura de ola significativa (H_s) en comparación con las mediciones realizadas por las boyas 42001. Se observa que en los instantes de tiempo que el huracán se está acercando a la boya (Cuadrante I y II - ver 27/08/2005 06:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00) se obtiene una mejor estimación del

parámetro de altura de ola significativa (H_s), y a medida que se distancia de la boya (Cuadrante IV - ver 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 06:00:00) se aleja del valor medido. Al considerar el campo de corrientes se presentan diferencias que varían entre el 5 % y 10 % en la estimación del la altura de ola significativa (H_s) si se compara con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes, acercándose al valor medido por la boya 42001. Finalmente, en la Figura 5-2 se observan diferencias de hasta 10 % en la estimación del periodo pico (T_p), a pesar de que en la mayoría de instantes de tiempo, el efecto de la interacción ola-corriente no modifica la frecuencia pico y sí presenta cambios en la estimación de la energía máxima. Similarmente, la Figura 5-3 presenta la comparación del espectro escalar de energía de frecuencias ($E(f)$) y los parámetros escalares del oleaje (H_s, T_p) obtenidos con las simulaciones con y sin corrientes. Esta vez, teniendo en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO durante el paso del huracán Katrina para la boya 42038 de la NOAA (ver Figura 5-1). Además se presenta el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y la categoría del huracán, para el periodo 27/08/2005 12:00:00 hasta 28/08/2005 12:00:00, cada 6 horas.

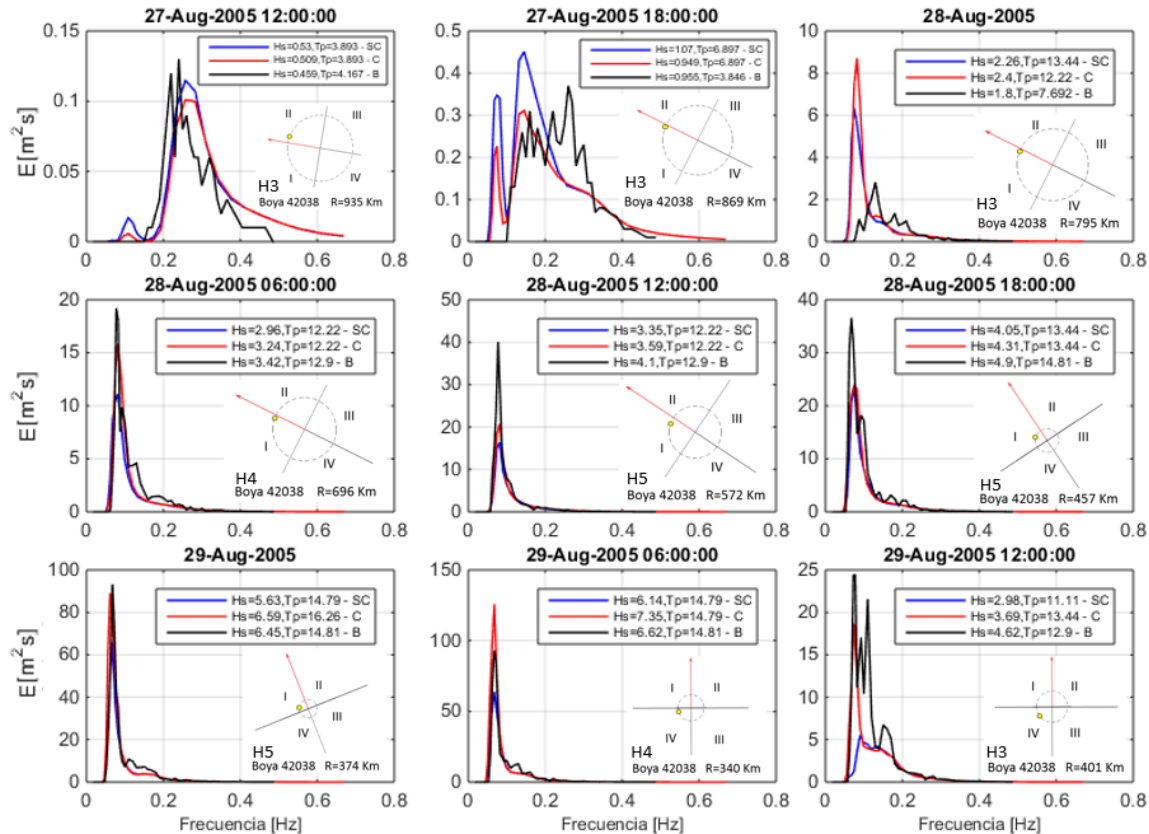


Figura 5-3.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias $E(f)$. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42038 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, corresponde al paso del Huracán Katrina. SC corresponde a la solución del espectro escalar de frecuencia $E(f)$ que no tienen en cuenta el campo de corrientes; C corresponde a las simulaciones que incluyen el campo de corrientes y B son los datos medidos por las boyas de la NOAA de los espectros escalares de energía. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicada la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos.

La Figura 5-3 muestra que en los primeros instantes de tiempo analizados (ver 27/08/2005 12:00:00 y 27/08/2005 18:00:00), la boya 42038 se encuentra en la parte frontal derecha (cuadrante II) del huracán, a distancias de 935 y 869 kilómetros, respectivamente, con respecto al centro de la tormenta. En estos instantes de tiempo el huracán tiene categoría 3, y se observa, que la energía se distribuye en un rango de frecuencias entre $0,042\text{ Hz}$ y $0,5\text{ Hz}$ y la frecuencia pico está alrededor de $0,3\text{ Hz}$. Además se observa que el efecto de la interacción ola-corriente, produce una disminución de la energía en todas las frecuencias, presentando una disminución de la altura de ola significativa (H_s), obteniendo una mejor estimación en comparación con las mediciones de la boya. El efecto de la interacción ola-corriente no modifica el valor del periodo pico (T_p) en comparación con los parámetros escalares obtenidos del espectro medido por la boya.

A medida que el huracán avanza en aguas profundas, incrementando hasta categoría 5 y disminuyendo la distancia con respecto a la boya 42038 (ver 28/08/2005 00:00:00 hasta 29/08/2005 00:00:00), la energía del huracán se concentra en las bajas frecuencias ($f < 0,15\text{ Hz}$) y la frecuencia pico se encuentra alrededor de $0,1\text{ Hz}$. En estos instantes la boya se encuentra ubicada en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán, donde las simulaciones numéricas con y sin corrientes subestiman la magnitud de la energía en comparación con los espectros medidos. Se observa que al incluir el efecto de las corrientes, se presenta una mejor estimación de los valores máximos de energía en comparación con los espectros medidos por las boyas. El efecto de las corrientes incrementa la energía, lo que se ve reflejado en el asomeramiento de la ola. Durante este periodo de simulación la energía se distribuye en las bajas frecuencias, presentando un sistema de oleaje tipo *swell*. Además, se observa que al tener en cuenta el efecto de las corrientes, se presenta una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje obtenidos con los espectros modelados, en comparación de los parámetros calculados con los espectros medidos por la boya.

La fecha 29/08/2005 06:00:00 corresponde al instante de tiempo en el cual el huracán presenta categoría 4 y se encuentra más cerca de la boya 42038 (340 kilómetros), presentando los máximos valores de energía y un sistema de oleaje tipo *swell* muy energético. Se observa que al incluir el efecto de la interacción ola-corriente, hay un incremento en la energía, sobrestimando el valor medido por la boya. A partir de este instante (ver 29/08/2005 06:00:00 y 29/08/2005 12:00:00), el huracán se empieza a distanciar de la boya, ubicándose en la parte trasera izquierda del huracán (Cuadrante IV). En este cuadrante, la energía se redistribuye en un rango de frecuencias más altas, presentando una distribución de la energía en diferentes picos (ver 29/08/2005 12:00:00).

En la mayoría de los instantes de tiempo, se obtiene una mejor estimación del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s) al considerar el efecto de las corrientes superficiales de AVISO en comparación con las mediciones realizadas por las boyas 42038 durante el paso del huracán Katrina. Se observa que en los instantes de tiempo en que el huracán se está acercando a la boya (Cuadrante I y II - ver 27/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 00:00:00) se obtiene una mejor estimación del parámetro de altura de ola significativa (H_s), en estos instantes el huracán incrementa de categoría 3 a 5. A medida que el huracán se distancia de la boya (Cuadrante IV - ver 29/08/2005 06:00:00 y 29/08/2005 12:00:00) la estimación de H_s se aleja del valor medido, en estos

instantes de tiempo el huracán desciende a categoría 3. El efecto de la interacción ola-corriente, en el asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s), calculado a partir del espectros de frecuencias ($E(f)$), concuerda con los resultados presentados en la Figura 4-15, donde en las fechas (28/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 00:00:00) se presenta una disminución de la altura de ola significativa (H_s) para la boya 42001 y un incremento en la boya 42038 al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales en la simulación numérica, esto debido a la dirección relativa entre las corrientes y el oleaje.

Al considerar el campo de corrientes superficiales, se presentan diferencias porcentuales en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) que varían entre el 10 % y 20 % en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes superficiales, acercándose al valor medido por la boya 42038. Similar a los resultados obtenidos para la boya 42001, se presentan diferencias del 10 % en la estimación del periodo pico (T_p) entre las simulaciones con y sin corrientes, aunque en la mayoría de instantes de tiempo el efecto de la interacción ola-corriente no modifica la frecuencia pico.

El efecto de la interacción ola-corriente en la modelación del oleaje presenta cambios en la magnitud y la distribución de la energía en las frecuencias (ver ecuación 3-12). En esta ecuación la variación del campo de corrientes (U) a lo largo de la coordenada espacial (s) en la dirección de propagación de la onda (θ), produce cambios en la variación temporal del número de onda (\dot{k}), la cual se relaciona con la frecuencia relativa (σ), usando la relación de dispersión, de la teoría lineal de ondas (ver ecuación 3-3). Al tener en cuenta la variación espacial del campo de corrientes, se presenta un cambio en las frecuencias del espectro direccional (Holthuijsen, 2010). Se observa que el campo de velocidad de corrientes modifica la magnitud del valor máximo de energía en el espectro y el valor de la frecuencia pico asociado a la máxima energía para las boyas 42001 y 42038, durante el paso del huracán Katrina. Se obtienen diferencias que oscilan entre -50 % y 50 % en la estimación del valor máximo de energía de los espectros escalares de frecuencias, durante el paso del huracán Katrina. En general, el efecto de la interacción ola-corriente presenta una redistribución de la energía en las frecuencias de la ola, mejorando la estimación del espectro escalar de energía ($E(f)$) y de los parámetros escalares del oleaje: altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), en la mayoría de instantes de tiempo durante el paso del huracán Katrina. Para analizar las variaciones que se presentan en la estimación del espectro escalar de frecuencias, se calcula el error porcentual comparando los resultados de las simulaciones con y sin corrientes.

$$Error\ porcentual = 100 * \frac{E(f)_{corrientes} - E(f)_{Sin\ corrientes}}{E(f)_{Sin\ corrientes}} \quad (5-1)$$

La Figura 5-4 presenta las diferencias porcentuales de los espectros escalares de frecuencias ($E(f)$) que se obtienen entre tener y no tener en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO en la modelación, calculados con la ecuación 5-1. Los datos corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, cada 6 horas, durante el paso del huracán Katrina. Se presentan las diferencias porcentuales que se obtienen al comparar los espectros escalares obtenidos con las simulaciones con y sin corrientes, para las boyas 42001 y 42038.

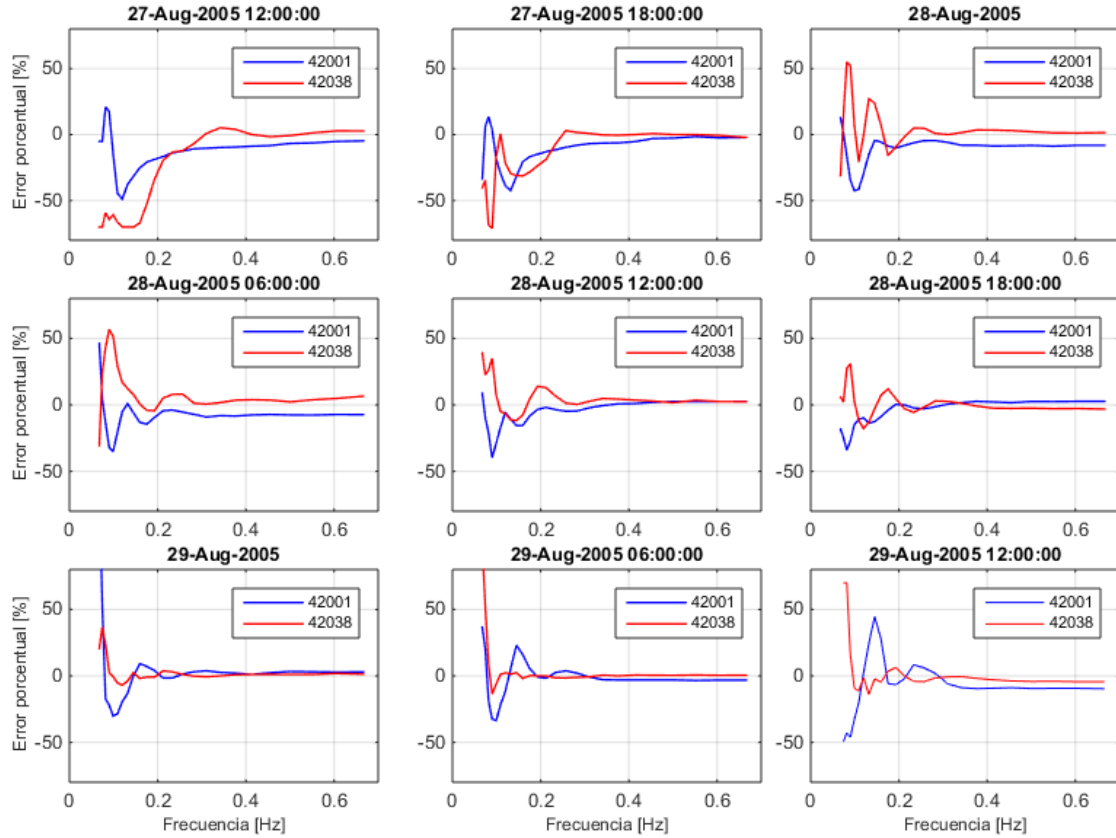


Figura 5-4.: Error porcentual del espectro de energía de frecuencias. Diferencia entre el espectro modelado teniendo en cuenta la interacción ola-corriente y el espectro que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes, para los puntos que corresponden a las boyas 42001 y 42038 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina.

El efecto de la interacción ola-corriente presenta grandes diferencias porcentuales de la energía en las bajas frecuencias ($0,042 \text{ Hz}$ hasta $0,2 \text{ Hz}$), en las cuales se concentra la mayor cantidad de energía durante el paso del huracán Katrina. En este rango de frecuencias el error porcentual oscila entre -50% y 50% . En el rango de frecuencias más altas ($0,2 \text{ Hz}$ hasta $0,6 \text{ Hz}$) donde los espectros presentan menor energía, las diferencias porcentuales oscilan entre -10% y 10% . Al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en la simulación numérica se presenta una disminución de la energía en las altas frecuencias en los instantes en los que la boya 42001 está ubicada en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II - ver 27/08/2005 12:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00). Cuando la boya se ubica en la parte trasera del huracán (cuadrante IV - ver 28/08/2005 18:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00) se presenta un incremento de la energía en las bajas frecuencias. En el caso de la boya 42038 cuando el huracán está más distante de la ubicación de la boya, es decir, en los primeros instantes de tiempo (ver 27/08/2005 12:00:00 y 27/08/2005 18:00:00), hay una disminución de la energía en las bajas frecuencias con la modelación que tiene en cuenta el campo de corrientes. Luego, a medida que el huracán se acerca a la boya (ver 28/08/2005 00:00:00 hasta 29/08/2005 00:00:00) se presenta un incremento en la energía en las bajas frecuencias. Las diferencias porcentuales de la energía al incluir el campo de corrientes se observan en la estimación de los parámetros escalares del oleaje cuando un incremento de energía en el espectro produce asomeramiento de la ola, y

una disminución de la energía presenta una disminución de la altura de ola significativa (H_s). Las mayores diferencias se presentan en la estimación de la energía en los valores más bajos de frecuencia ($< 0,08 \text{ Hz}$), a pesar de que la energía asociada a este rango de frecuencias sea mínimo.

5.1.2. Huracán Rita

La Figura 5-5 presenta la comparación del espectro escalar de energía de frecuencias $E(f)$ calculado con el modelo de oleaje WWIII teniendo en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, durante el paso del huracán Rita para la boya 42002 de la NOAA. Esta figura muestra la magnitud de la altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) obtenidos a partir de los espectros escalares y de las mediciones de la boya. Además se presenta el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y la categoría del huracán, para el periodo 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, cada 6 horas.

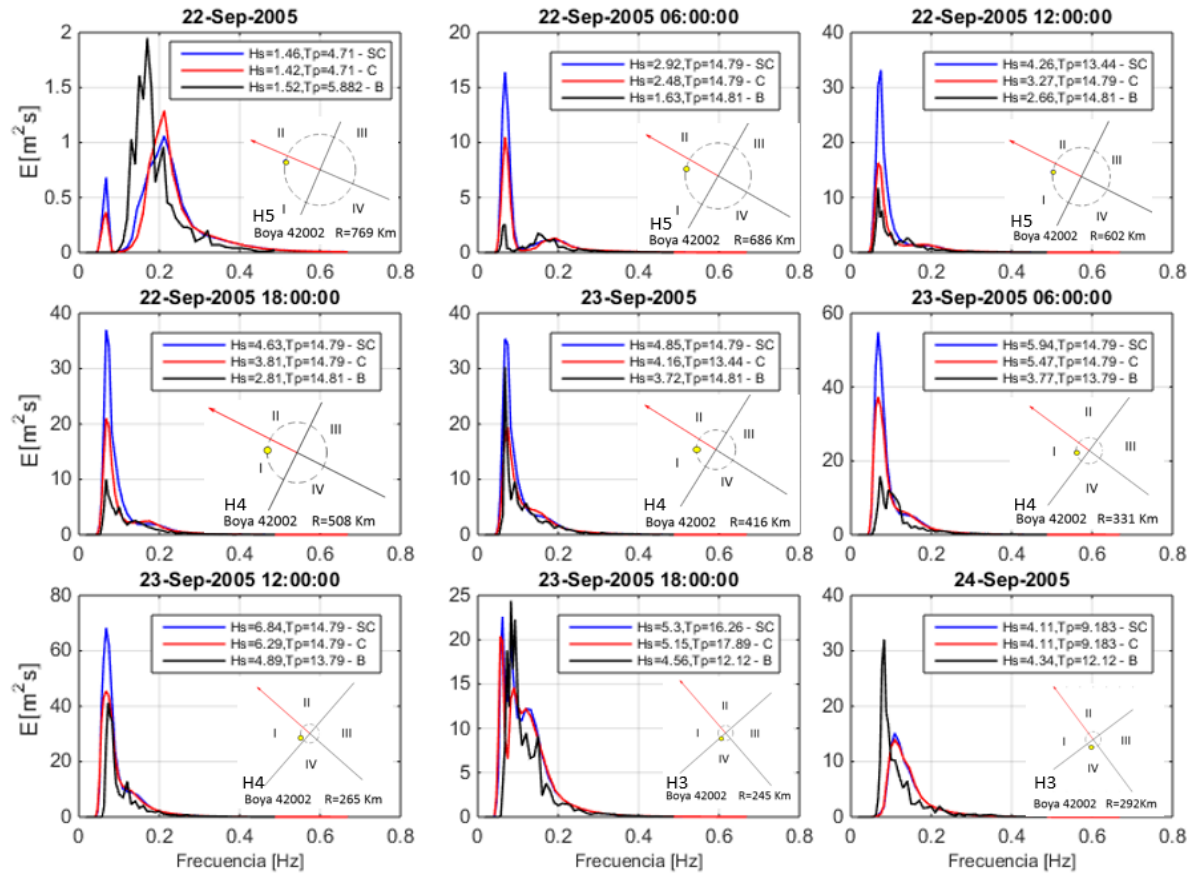


Figura 5-5.: Efecto de las corrientes en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42002 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 corresponde al paso del Huracán Rita. *SC* corresponde a la solución obtenida de los espectros escalares de frecuencia que no tienen en cuenta el campo de corrientes; *C* corresponde a las simulaciones que incluyen el campo de corrientes y *B* son los datos medidos por las boyas de la NOAA de los espectros escalares de energía. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos.

Similarmente, la Figura 5-6 presenta la comparación del espectro escalar de energía de frecuencias ($E(f)$) calculado con el modelo de oleaje teniendo en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, para la boya 42040 de la NOAA durante el paso del huracán Rita. Además, se presenta el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al ojo del huracán.

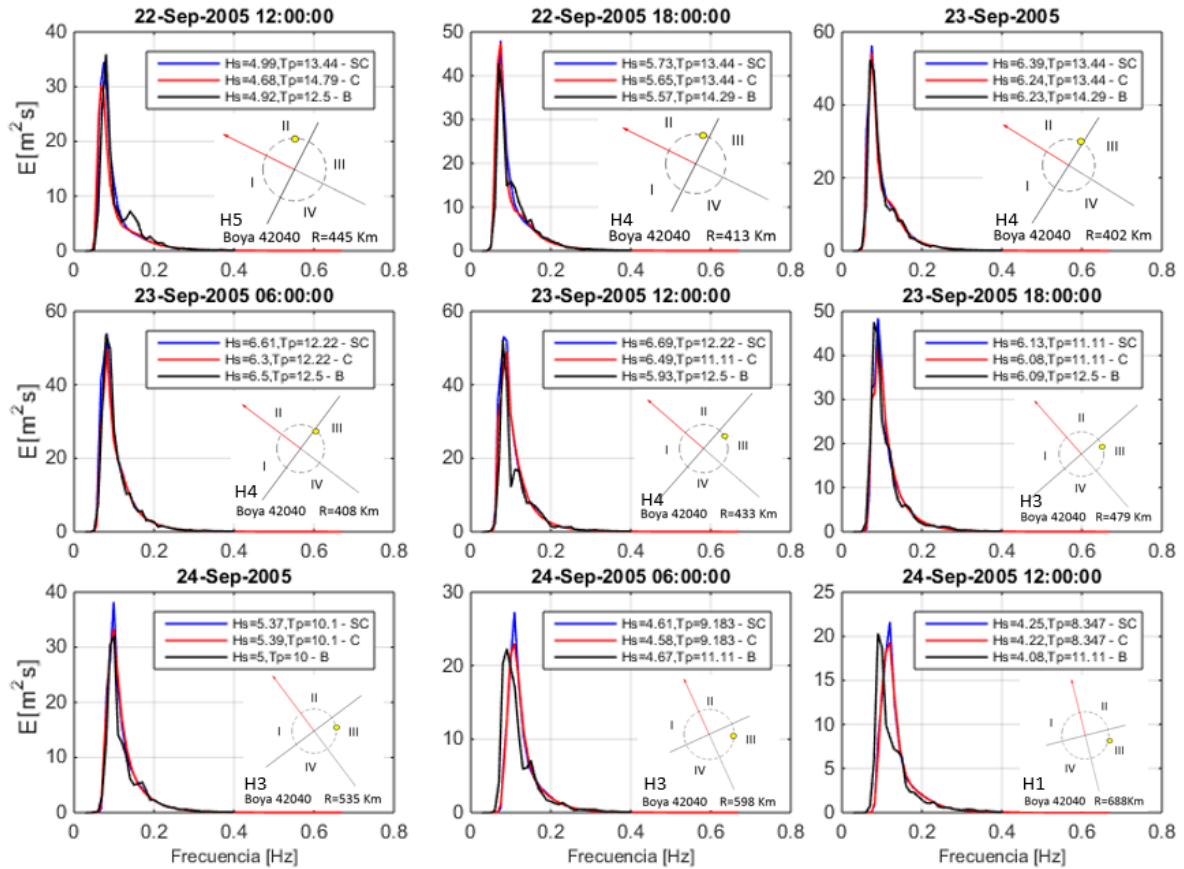


Figura 5-6.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, correspondiente al paso del Huracán Rita. El recuadro representa el cuadrante en el que está ubicado la boya y la distancia con respecto al centro de la tormenta, la dirección de traslación y categoría del huracán. H_s corresponde a la altura de ola significativa en metros y T_p al periodo pico en segundos.

Los resultados obtenidos en la boya 42002 para el primer instante de tiempo analizado (ver 22/09/2005 00:00:00), muestran que la energía se distribuye en un rango de frecuencias entre 0,042 Hz y 0,4 Hz y que la frecuencia pico está alrededor de 0,2 Hz . En este instante el huracán es categoría 5 y la boya se ubica en la parte frontal izquierda (cuadrante I), a una distancia de 769 kilómetros con respecto al ojo del huracán. A medida que el huracán avanza en aguas profundas y disminuye la distancia con respecto a la boya 42002 (ver 22/09/2005 06:00:00 hasta 23/09/2005 12:00:00), predomina un sistema de oleaje tipo *swell*, donde la energía del huracán se concentra en las bajas frecuencias ($f < 0,15 \text{ Hz}$) y la frecuencia pico está alrededor de 0,1 Hz . En estos instantes de tiempo, el huracán disminuye a categoría 4 y la boya se encuentra ubicada en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán, donde las simulaciones numéricas con y sin corrientes

sobrestiman la magnitud de la energía en comparación con los espectros medidos. Al incluir el efecto de la interacción ola-corriente se obtiene una disminución de la energía, obteniendo una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias y de los parámetros escalares del oleaje en comparación con las mediciones realizadas por las boyas de la NOAA. A pesar de que la fecha 23/09/2005 18:00:00, corresponde al instante de tiempo en el cual el huracán se encuentra más cerca de la boya 42002 (245 kilómetros), no se presentan los valores máximos de energía, esto se debe a que en este instante el huracán desciende a categoría 3 y la boya se ubica en la parte trasera izquierda (cuadrante IV) del huracán, que corresponde al cuadrante menos energético (Hu & Chen, 2011; Montoya et al., 2013; Bennett & Mulligan, 2017), mientras en el instante que presenta la mayor energía (23/09/2005 12:00:00), el huracán es categoría 4 y la boya está ubicada en el cuadrante I. A partir de este instante (ver 23/09/2005 18:00:00 y 24/09/2005 00:00:00), el huracán desciende de categoría y se empieza a distanciar de la boya, la cual se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (Cuadrante IV) donde la energía se redistribuye en un rango de frecuencias más altas, presentando diferentes picos de energía (24/09/2005 06:00:00). Este resultado concuerda con el análisis realizado por Hu & Chen (2011) sobre el comportamiento del espectro de energía según el cuadrante en el que está ubicado. En la mayoría de instantes de tiempo estudiados, la interacción ola-corriente representa una disminución de los valores máximos de energía, lo cual significa una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias con respecto al espectro medido por la boya 42002. A partir del espectro escalar de frecuencias se estima el valor de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p). Al considerar el campo de corrientes, las diferencias que se presentan en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) varían entre el 10 % y 20 % en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes, para la boya 42002. Se presenta diferencias del 10 % en la estimación del periodo pico (T_p), aunque en la mayoría de instantes de tiempo el efecto de la interacción ola-corriente no modifica la frecuencia pico, aunque si presenta cambios en la estimación de la energía máxima.

En el caso de la boya 42040, en la Figura 5-6, se observa que las simulaciones con y sin corrientes, presentan una mejor estimación del comportamiento de los espectros modelados en comparación con los espectros medidos por las boyas. En este caso se presenta menor variación de los valores máximos de energía al tener en cuenta el efecto de las corrientes. En los tres primeros instantes de tiempo analizados (ver 22/09/2005 12:00:00 hasta 23/09/2005 00:00:00), el huracán es categoría 4 y la boya se encuentra en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante II), con distancias mayores a 400 kilómetros con respecto al centro del huracán. En estos instantes, se observa que la energía se distribuye en un rango de frecuencias entre 0,042 Hz y 0,2 Hz y la frecuencia pico se encuentra alrededor de 0,1 Hz. Además, se observa que el efecto de la interacción ola-corriente produce una disminución de la energía, disminuyendo la magnitud de la altura de ola significativa (H_s). La fecha 23/09/2005 00:00:00 corresponde al instante cuando el huracán se encuentra más cerca de la boya (402 kilómetros), donde se presentan los valores máximos de energía y donde predomina un sistema de oleaje tipo *swell* muy energético. A partir de este instante (ver 23/09/2005 06:00:00 y 24/09/2005 12:00:00), el huracán empieza a disminuir de categoría e incrementa la distancia respecto a la boya, la cual se ubica en la parte trasera derecha del huracán (Cuadrante III) donde la energía se redistribuye en un rango de frecuencias más altas (24/09/2005 06:00:00 y 24/09/2005

12:00:00). En la mayoría de los tiempos medidos, al considerar el efecto de la interacción ola-corriente durante el paso del huracán Rita, se obtiene una mejor estimación del parámetro escalar de altura de ola significativa (H_s) con respecto a las mediciones realizadas por las boyas 42040. El efecto del campo de corriente produce una disminución de la energía en el espectro escalar, lo que indica que hay una disminución en la altura de la ola. Al considerar el campo de corrientes, las diferencias porcentuales que se presentan en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) varían entre el 3 % y 5 %, y alrededor del 10 % en el periodo pico (T_p), en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes. El efecto de la interacción ola-corriente, en el asomeramiento/disminución de la altura de ola significativa (H_s), calculado a partir del espectros de frecuencias ($E(f)$), concuerda con los resultados presentados en la Figura 4-21, donde en las fechas (22/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 00:00:00) se presenta una disminución de la altura de ola significativa (H_s) para la boya 42002 y 42040 al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales en la simulación numérica, esto debido a la dirección relativa entre las corrientes y el oleaje. La Figura 5-7 presenta la diferencia porcentual que se obtiene entre incluir o no el efecto del campo de corrientes superficial de AVISO en la modelación. Los datos corresponden a las fechas que van desde 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, con datos cada 6 horas, durante el paso del huracán Rita. La diferencia porcentual se estima con la ecuación 5-1.

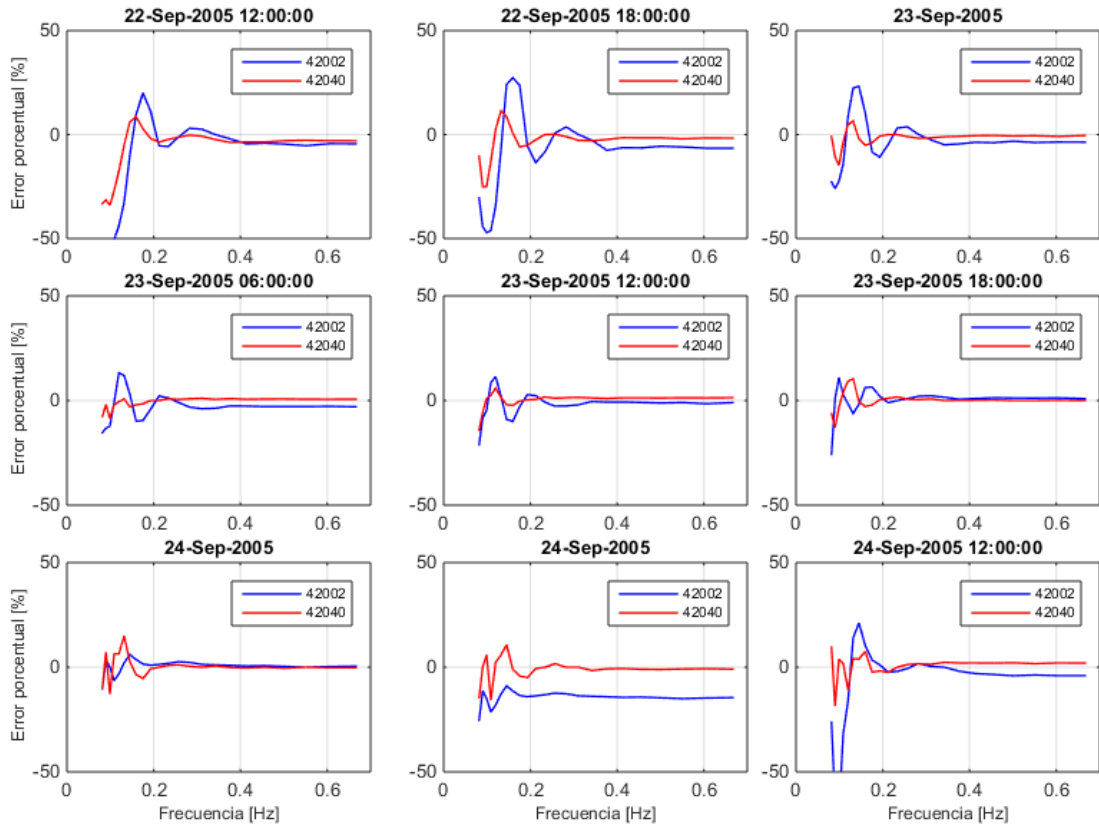


Figura 5-7.: Error porcentual del espectro de energía de frecuencias. Diferencia entre el espectro modelado teniendo en cuenta la interacción ola-corriente, y el espectro que no tienen en cuenta el efecto de las corrientes, para los puntos que corresponden a las boyas 42002 y 42040 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, que corresponde al paso del Huracán Rita.

En el caso del huracán Rita, al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, se presentan grandes diferencias porcentuales de la energía en las bajas frecuencias (0,042 Hz hasta 0,2 Hz), en las cuales se concentra la mayor cantidad de energía en los diferentes tiempos analizados. Las diferencias porcentuales oscilan entre -30% y 30% , presentando valores pico que van hasta 50% . En el rango de frecuencias más alto las diferencias porcentuales están alrededor de 10% . Las mayores diferencias porcentuales se presentan en la estimación de la energía para las frecuencias bajas ($< 0,08\ Hz$), a pesar de que la energía asociada a este rango de frecuencias sea mínimo. Se observa un comportamiento similar del espectro escalar de frecuencias modelado en la boya 42002 durante el huracán Rita, en comparación con las boyas 42001 y 42038 del huracán Katrina, las cuales se ubican en la mayoría de instantes, en la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV). La boya 42040 ubicada en la parte derecha del huracán (cuadrantes II y III), presenta una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias, y al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, se presenta menor variación en el comportamiento del espectro escalar comparado con las demás boyas.

5.1.3. Error cuadrático medio de la energía para ambos huracanes

La comparación de los espectros escalares calculados con el modelo de oleaje (WWIII) y los espectros medidos por las boyas de la NOAA se realizan calculando el error cuadrático medio (RMSE) de la energía. Se obtiene un valor del error cuadrático medio para cada instante de tiempo del huracán, que se calcula con los valores de energía asociado a cada valor de frecuencia en el espectro modelado (EM), con la información disponible del espectro escalar de frecuencias medido por la boya (EO). Se obtiene para cada instante de tiempo, un valor del error cuadrático medio, para las simulaciones con y sin corrientes. Además, se calcula el error porcentual del error cuadrático medio, a partir de la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (EM_i - EO_i)^2}{n}} \quad (5-2)$$

$$Error\ Porcentual = 100 \times \frac{RMSE_{corrientes} - RMSE_{Sin\ corrientes}}{RMSE_{Sin\ corrientes}} \quad (5-3)$$

La Figura 5-8 presenta el error cuadrático medio (RMSE) que se obtiene al comparar los espectros escalares modelados con y sin corrientes, y los espectros medidos por las boyas 42001 y 42038 en el caso del huracán Katrina, y las boyas 42002 y 42040 durante el huracán Rita. Los resultados se presentan para los tiempos en los que hay disponibilidad de información del espectro escalar de frecuencias medido por la boya (ver Figura 5-1). Además se presenta la diferencia porcentual del error cuadrático medio que se obtiene con la ecuación 5-3, para evaluar el cambio en el error porcentual del RMSE al tener en cuenta el campo de corrientes.

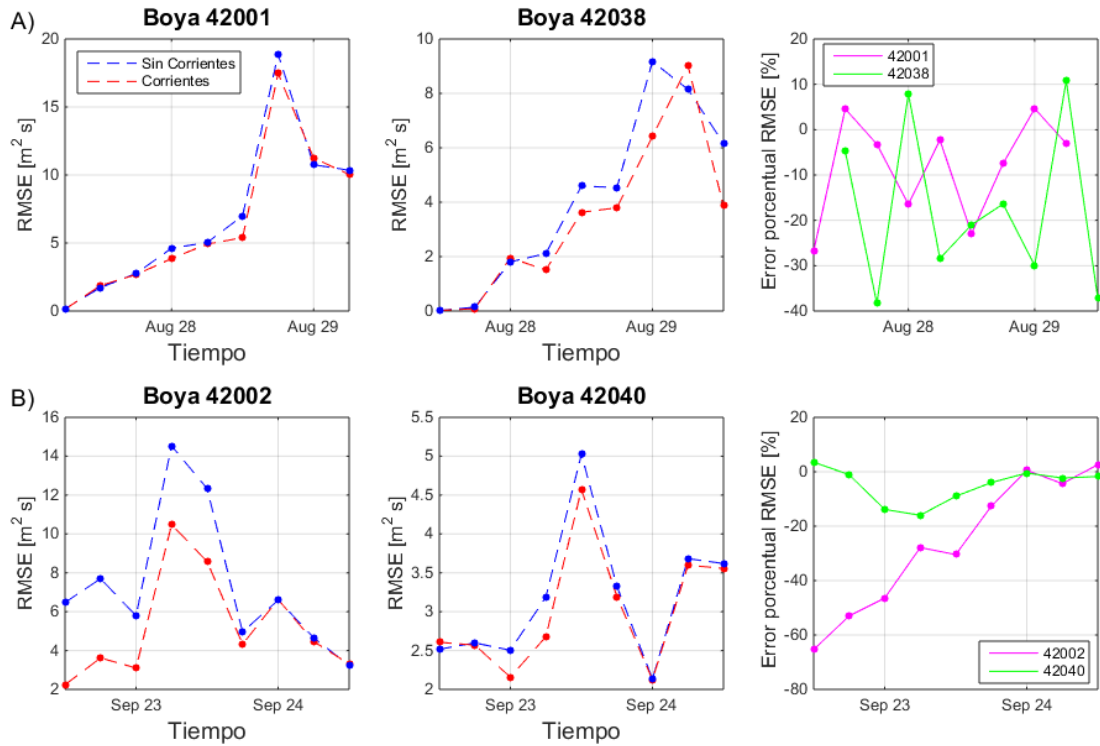


Figura 5-8.: Error cuadrático medio del espectro escalar de energía. (A) Comparación de los espectros escalares modelados con los datos medidos por las boyas 42001 y 42038 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (B) Comparación de los espectros escalares modelados con los datos medidos por las boyas 42002 y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita.

En general, se observó que durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, hay una mejor estimación de los espectros escalares de frecuencias $E(f)$ al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje. Cuando se compara la modelación con corrientes y sin corrientes se observa que los errores cuadráticos medios para la mayoría de instantes son menores, al comparar los espectros modelados con las mediciones de las boyas 42001 y 42038 en el caso del huracán Katrina, y las boyas 42002 y 42040 para el huracán Rita. Los valores máximos del error cuadrático medio están asociados a los instantes de tiempo cuando el huracán se encuentra más cerca a la boya, donde se presentan las olas con mayor energía. Cuando se compara la modelación con y sin corrientes se observa que los errores cuadráticos medios para cada instante de tiempo son menores para el caso con corrientes. Esta reducción genera disminuciones en los valores del RMSE hasta de 25 % para la boya 42001 y 40 % para la 42038, durante el paso del huracán Katrina, y disminuciones en los valores de RMSE de 65 % para la boya 42002 y 20 % para la boya 42040, durante el paso del huracán Rita. Estas diferencias porcentuales indican que es importante tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente para obtener una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias ($E(f)$) durante condiciones extremas de viento de huracán. A pesar de que hay una estimación precisa de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p), se observa que el modelo no representa adecuadamente el comportamiento del espectro escalar de frecuencias en algunos instantes de tiempo durante el paso de los huracanes Katrina y Rita.

5.2. Espectro direccional de energía

Los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p) y el espectro de frecuencias $E(f)$, estudiados en la secciones 4.2 y 5.1 no representan en su totalidad el comportamiento de la energía en el espacio espectral (f, θ) . Por esta razón, en esta sección se analiza el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro direccional de energía del oleaje $E(f, \theta)$. Para validar los resultados obtenidos con la modelación espectral del oleaje se seleccionan las boyas que tienen las mediciones de los parámetros necesarios para calcular el espectro direccional medido (ver 2.2.2), en este caso las boyas que tienen la información disponible son la 42001, 42036, y 42040, durante el paso del huracán Katrina, y las boyas 42036 y 42040, durante el paso del huracán Rita.

En esta sección, se analizan las diferencias en el comportamiento de los espectros direccionales de energía del oleaje $E(f, \theta)$ al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral. Además se presenta la comparación de los datos modelados con los espectros medidos por las boyas de la NOAA. Los datos de corrientes superficiales que se usan en las simulaciones corresponden a la velocidad zonal y meridional que se obtiene de la información satelital de corrientes de AVISO.

La Figura 5-9 presenta la ubicación de las boyas de las NOAA (punto verde y contorno negro) empleadas para validar los resultados obtenidos del espectro direccional de energía, con ambas simulaciones. Además se presenta la trayectoria de los huracanes Katrina y Rita, indicando la categoría, de la siguiente forma: Tormenta tropical (ST-Verde), Huracán categoría 1 (H1-Amarillo), categoría 2 (H2-Naranja), categoría 3 (H3-Rojo), categoría 4 (H4-Rosado), y categoría 5 (H5-Morado).

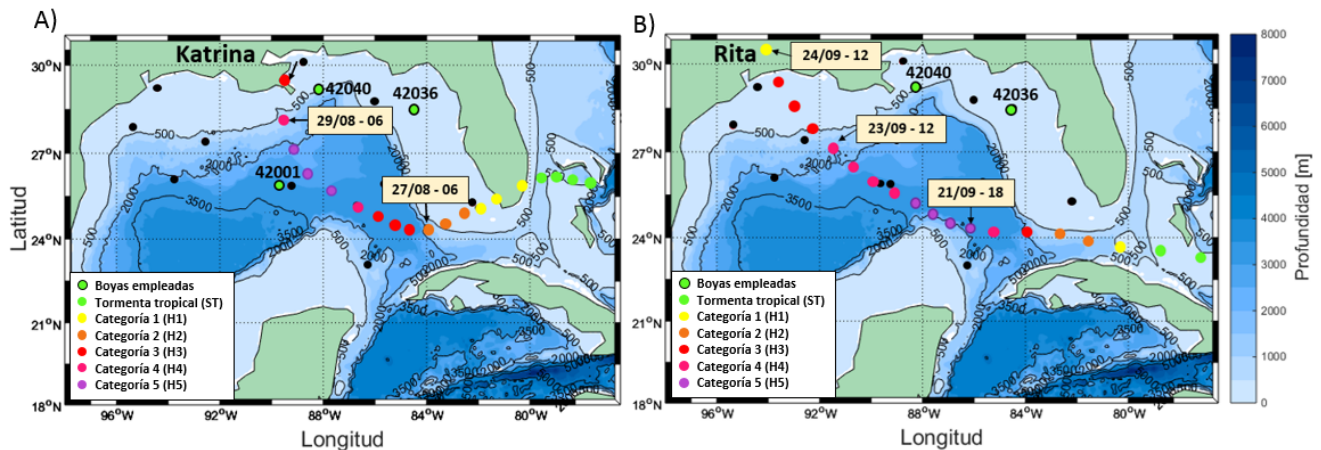


Figura 5-9.: Ubicación de las boyas 42001, 42036 y 42040 de la NOAA y trayectoria del huracán Katrina y Rita, para el análisis de los espectros direccionales de energía.

5.2.1. Huracán Katrina

La Figura 5-10 presenta el efecto de la interacción ola-corriente en la estimación del espectro direccional de energía del oleaje ($E(f, \theta)$), y la diferencia con la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes ($E(f, \theta)_{Corrientes} - E(f, \theta)_{SinCorrientes}$). Se presentan los resultados obtenidos para los instantes de tiempo 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. En estos instantes de tiempo, el huracán se encuentra más cerca de la boya 42001 y alcanza la categoría 5. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42001 de la NOAA. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

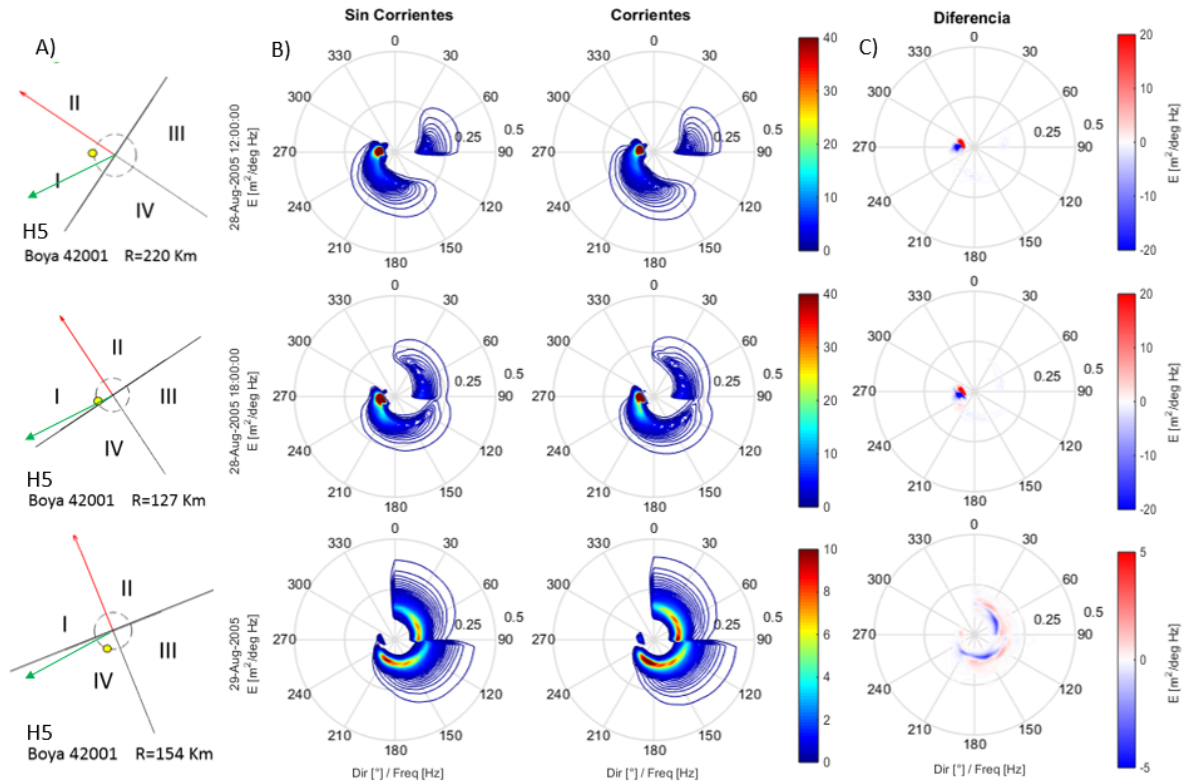


Figura 5-10.: Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42001 de la NOAA, para las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

La Figura 5-11 presenta la solución obtenida del espectro direccional de energía del oleaje con y sin la interacción ola-corriente. Se presentan las soluciones obtenidas para los instantes 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina. En estos instantes de tiempo, el huracán alcanza la categoría 5. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42040 de la NOAA. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

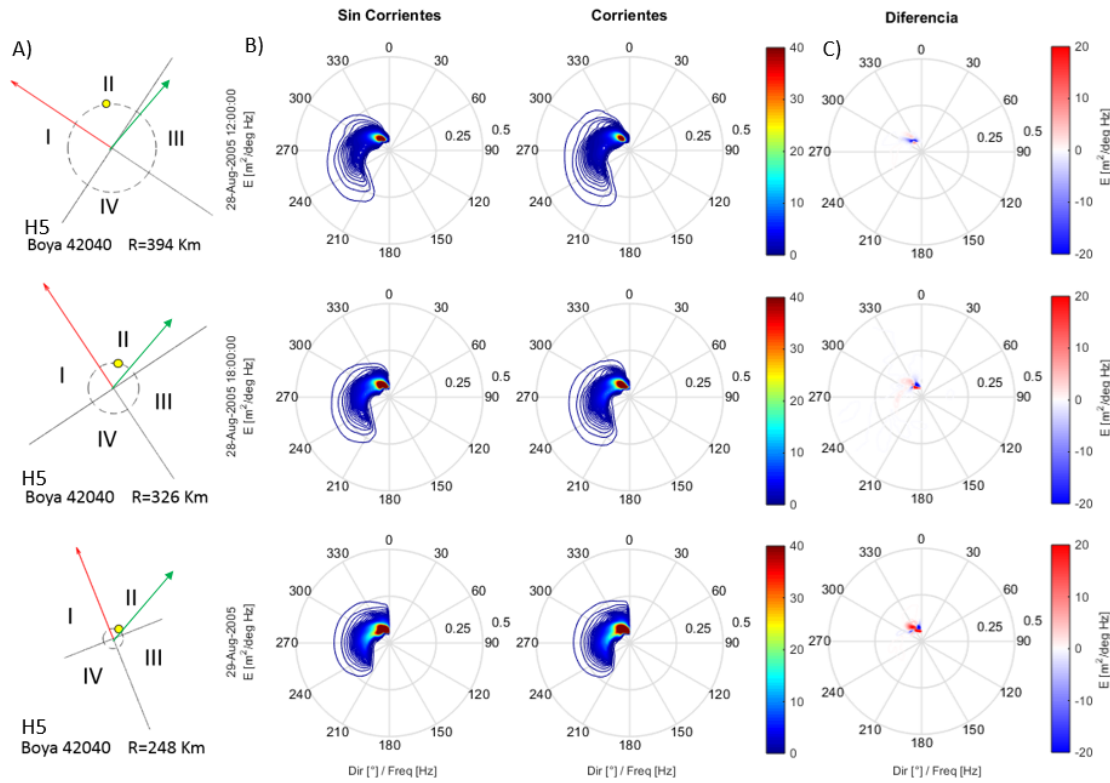


Figura 5-11.: Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42040 de la NOAA, para las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.

La interacción ola-corriente produce una redistribución de la energía en el espacio espectral de frecuencias (f) y direcciones (θ), durante todos los instantes analizados del paso del huracán Katrina. La presencia del campo de corrientes superficiales produce cambios en la amplitud, frecuencia y dirección de las olas, debido a la transferencia de energía entre olas y corrientes, el desplazamiento de frecuencias (efecto Doppler) y la refracción inducida por las corrientes (Holthuijsen, 2010). En el caso de la boya 42001, se analiza el comportamiento del espectro direccional en los instantes en que el huracán alcanza la categoría 5, que coinciden con los instantes en que el huracán se encuentra más cerca de la boya. Los análisis de los espectros para ambas modelaciones con corrientes y sin corrientes muestran que en los dos primeros instantes (ver 28/08/2005 12:00:00 y 28/08/2005 18:00:00) cuando la boya está ubicada en la parte frontal izquierda del huracán (Cuadrante I), el comportamiento del espectro direccional concentra la energía en un rango de direcciones entre 240° y 270° . Además, se presenta una componente en la dirección 90° de baja energía. En el instante (29/08/2005 00:00:00) la boya se ubica en la parte trasera del huracán (cuadrante IV), y el comportamiento del espectro direccional concentra la energía en dos rangos de dirección (30° - 90° y 170° - 210°). Esto concuerda con los resultados obtenidos por Hu & Chen (2011); Bennett & Mulligan (2017), que indican que en la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV), el comportamiento del espectro direccional concentra los valores máximos de energía en dos direcciones diferentes, siendo más significativo en la parte frontal izquierda (cuadrante IV). En el espectro que

presenta las diferencias de magnitud de la energía entre la simulación con corrientes y la simulación sin corrientes se observa que en algunos valores de (f, θ) hay un incremento de la energía (rojo), mientras en otros disminuye (azul). Cuando la boya está ubicada en la parte frontal izquierda del huracán, el efecto de la interacción ola-corriente produce una redistribución de la energía, hacia las bajas frecuencias ($< 0,15 \text{ Hz}$) y se observa que hay una variación de la dirección, hacia un valor de 300° . Cuando la boya está ubicada en la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV), el efecto de las corrientes superficiales, producen una redistribución de la energía en un rango mayor de direcciones ($0^\circ - 210^\circ$), y en un rango mayor de frecuencias. Las variaciones que se presentan en las frecuencias concuerdan con los resultados obtenidos en los espectros escalares de energía presentados en la Figura 5-2, en cual se observa que cuando la boya está en la parte frontal del huracán (cuadrantes II y III) hay una redistribución de la energía hacia las bajas frecuencias, y cuando se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV), hay una distribución de la energía hacia frecuencias más altas. En los instantes de tiempo analizados, la dirección de las corrientes (flecha verde) coincide con la dirección en la que se concentra la mayor parte de la energía en el espectro (aproximadamente 240°). Este efecto, produce una disminución de la energía, como se observa en los espectros de frecuencias (ver 5-2), lo que produce una disminución de la altura de ola significativa (H_s) (ver Figuras 4-14 y 4-15).

En el caso de la boya 42040, en la Figura 5-11 los tiempos analizados (28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00) corresponden a la categoría 5 del huracán. La boya se ubica en la parte frontal derecha (cuadrante II). En este cuadrante se observa que la dirección que presenta el oleaje coincide con la dirección de traslación del huracán. Esta coincidencia concuerda con los resultados obtenidos por Moon et al. (2003) y Montoya et al. (2013) en la modelación espectral del oleaje en condiciones extremas de huracán. Se observa también que al estar ubicado en la parte derecha del huracán (cuadrante II) el comportamiento del espectro direccional de energía presenta un comportamiento unimodal (Hu & Chen, 2011; Bennett & Mulligan, 2017), donde los valores máximos de energía se concentran en un solo rango de frecuencias. Los valores máximos de energía se concentran inicialmente en un rango mayor de direcciones y en valores de frecuencias más altos. A medida que avanza el huracán y se acerca a la ubicación de la boya (28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00), la energía se concentra en una menor cantidad de direcciones y en un rango de frecuencias más bajo. En los instantes de tiempo analizados la dirección de las corrientes (flecha verde) forma un ángulo de aproximadamente 90° con respecto a la dirección del oleaje, lo que produce un efecto de disminución de la energía, lo que concuerda con la disminución de la altura de ola significativa (H_s) (ver Figuras 4-14 y 4-15). En el espectro que indica las diferencias entre la simulación con y sin corrientes, se observa que, en los tres instantes de tiempo, el efecto de las corrientes produce un cambio de la dirección del oleaje y un cambio en la energía en las bajas frecuencias. Se observa que las diferencias que se obtienen para la boya 42040 ubicada en la parte derecha del huracán (cuadrantes II y III) son menores en comparación con las diferencias que se presentan en la boya 42001 ubicada en la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV), teniendo en cuenta que para los instantes analizados, la trayectoria del huracán, está más cerca de la boya 42001, donde se producen las condiciones más energéticas del oleaje y las corrientes.

En general, al incluir el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, se presenta una redistribución de la energía hacia las bajas frecuencias ($< 0,15 \text{ Hz}$) y una variación de la dirección pico (θ_p), debido a la dirección entre las corrientes y el oleaje. Las máximas diferencias positivas y negativas en la estimación de los espectros direccionales de energía, se presentan cuando el huracán está más próximo al punto que corresponde a la ubicación de la boya 42001 (28/08/2005 18:00:00) y de la boya 42040 (29/08/2005 00:00:00). Al presentarse cambios en la distribución de la energía en direcciones (θ) y frecuencias (f), debido al efecto del campo de corrientes, se presentan las mayores diferencias con respecto a la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes. Al comparar el comportamiento del espectro direccional modelado obtenido con y sin corrientes, se observa que la boya 42001 ubicada en la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV), presenta una distribución de la energía concentrada en dos direcciones, mientras que la boya 42040 ubicada en la parte izquierda del huracán, donde el comportamiento del espectro direccional es unimodal. Esto concuerda con los resultados obtenidos por diferentes autores, al analizar el comportamiento del espectro direccional de energía, dependiendo del cuadrante en que está ubicado con respecto a la dirección de traslación y al ojo del huracán (Zhou et al., 2008; Montoya, 2013; Hu & Chen, 2011; Bennett & Mulligan, 2017). La Figura 5-12 presenta el espectro direccional calculados con y sin corrientes, y el espectro medido por la boya 42001 de la NOAA. Se presenta la solución para las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.

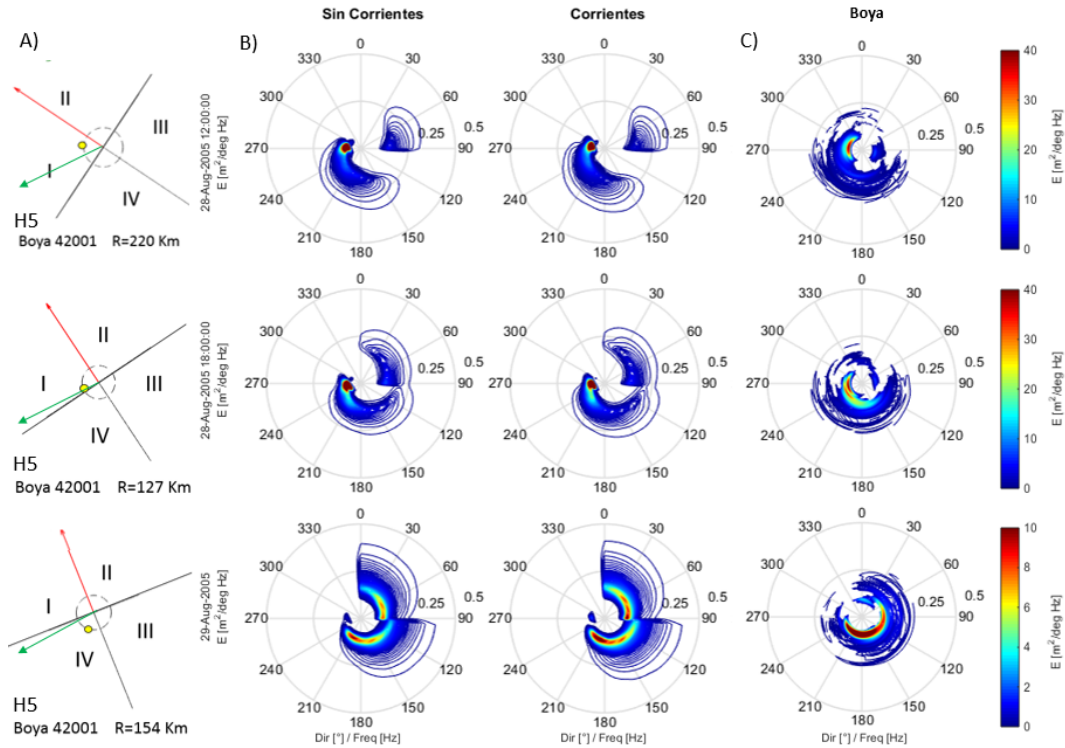


Figura 5-12.: Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2005 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

La Figura 5-13 presenta la comparación entre el espectro direccional modelado y el espectro medido por las boyas 42040 de la NOAA. Se presentan las soluciones para los instantes 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, durante el paso del huracán Katrina.

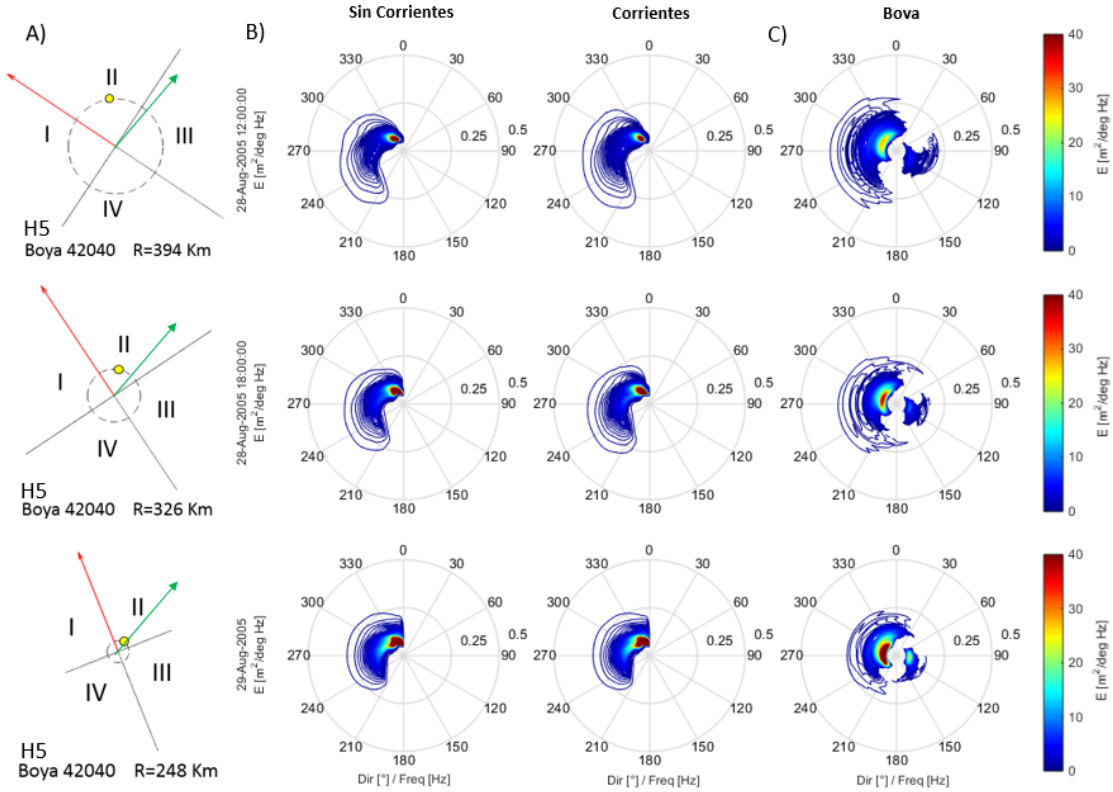


Figura 5-13.: Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 28/08/2005 12:00:00, 28/08/2008 18:00:00 y 29/08/2005 00:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

De las Figuras 5-12 y 5-13, se observan diferencias en la distribución de la energía en los espectros direccionales calculados con el modelo de oleaje (WWIII) y los espectros medidos por las boyas 42001 y 42038 de la NOAA, presentando variaciones en la distribución de la energía en el espacio de coordenadas (f, θ) . El espectro que se obtiene a partir de la modelación numérica con y sin corrientes $(E(f, \theta))$, distribuye la energía en un rango de frecuencias similar al espectro medido por la boya (0,042 – 0,3 Hz), concentrando la mayor energía en las bajas frecuencias (0,042 – 0,15 Hz). Se observa menor dispersión direccional de la energía en el espectro modelado, el cual concentra la energía en un rango menor de direcciones en comparación con el espectro medido. Estos últimos presentan una componente del oleaje que proviene del este, que el modelo solo representa en la boya 42001 (ver figura 5-13). En general, se observa que el modelo sobrestima los valores máximos de energía para los diferentes instantes de tiempo del paso del huracán Katrina y se concentra en un rango menor de direcciones, mientras que los datos modelados presentan una mayor dispersión de los valores máximos de energía en un rango mayor de direcciones.

Aunque los parámetros escalares del oleaje, altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p), se ajustan bien a los datos medidos por las boyas, se observa que en el caso de los espectros direccionales de energía, el modelo se aproxima con menos exactitud al comportamiento del espectro medido. El modelo no representa adecuadamente los valores máximos y la distribución de la energía en frecuencias y direcciones en todos los instantes. Los espectros que se obtienen a partir de las simulaciones numéricas tienen un comportamiento redondeado o suavizado, por lo que no se ajusta adecuadamente al comportamiento del espectro medido por la boya. Este efecto se debe a los esquemas numéricos empleados en la solución de las ecuaciones que representan el movimiento de las oleaje. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que las mediciones realizadas por las boyas de la NOAA presentan dificultades durante condiciones extremas de huracán. Además, el comportamiento que se obtiene del espectro direccional es una aproximación de los métodos empleados por la NOAA para calcular el espectro a partir de las mediciones (Montoya et al., 2013). Es importante tener en cuenta que las mediciones realizadas por las boyas de las NOAA, presentan errores que están relacionados con la selección y diseño instrumental de las boyas, las cuales son dependientes de las características climáticas del área, la dirección predominante del viento y las condiciones del mar en el sitio ?montoya2013wave.

En el caso de la boya 42001, cuando se considera el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación, se obtiene una redistribución de la energía en el espectro de frecuencias y direcciones como se presenta en la Figura 5-10. En los dos primeros instantes (ver 28/08/2005 12:00:00 y 28/08/2005 18:00:00), el huracán es categoría 5 y se encuentra a distancias de 220 y 127 kilómetros, respectivamente. Es estos instantes la boya está ubicada en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán, se observa que el modelo representa adecuadamente el rango de direcciones donde se concentran los valores máximos de energía (aproximadamente 280°). Sin embargo, el espectro medido presenta una mayor dispersión direccional de la energía en las demás direcciones. Al tener en cuenta el efecto de las corrientes, la energía se desplaza hacia las bajas frecuencias. En el instante (29/08/2005 00:00:00), el huracán es categoría 5 y se encuentra a 154 kilómetros de la boya, la cual se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV). En este cuadrante el modelo presenta un comportamiento del espectro direccional ($E(f, \theta)$) que concentra la energía en dos direcciones diferentes (aproximadamente 90° y aproximadamente 210°), mientras el espectro medido presenta mayor difusión de la energía. El espectro modelado presenta una distribución de la energía en un rango mayor de frecuencias ($0,042 - 0,35 \text{ Hz}$), en comparación con el espectro medido ($0,042 - 0,30 \text{ Hz}$), teniendo en cuenta que la máxima cantidad de energía se concentra en las bajas frecuencias ($< 0,15 \text{ Hz}$). En el caso de la boya 42040, el modelo representa adecuadamente las direcciones en las que se concentra la mayor energía de la ola (aproximadamente 320°), sin embargo sobrestima los valores máximos de energía, y presenta una menor dispersión con respecto al espectro medido. Se observa además que en los espectros medidos hay una componente en la dirección 120° , que el modelo no representa, y que en algunas situaciones puede estar asociado a la precisión de las mediciones y a los métodos empleados para generar el espectro direccional de energía medido por la boya (Montoya et al., 2013). Las diferencias entre el espectro con y sin corrientes, calculado con el modelo de oleaje (WWIII) y el espectro medidos por las boyas de la NOAA, se estiman calculando el error cuadrático medio (RMSE). Para una mejor visualización de la información, se calcula el

RMSE del espectro de energía como función únicamente de la frecuencia o de la dirección (ecuación 5-4). Adicionalmente, se calcula el RMSE de los valores que corresponden a cada pareja de datos de frecuencia y dirección (f, θ) para el espectro modelado y el espectro medido por la boya de la NOAA (ecuación 5-5).

$$RMSE(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (EM(f_i, \theta) - EO(f_i, \theta))^2}{n}}, \quad RMSE(f) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (EM(f, \theta_i) - EO(f, \theta_i))^2}{m}} \quad (5-4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (EM(f_i, \theta_j) - EO(f_i, \theta_j))^2}{m \times n}} \quad (5-5)$$

La Figura 5-14 presenta el error cuadrático medio que se obtiene a partir de los resultados de la modelación espectral con y sin corrientes, y de los datos medidos por las boyas. El gráfico muestra el comportamiento del error cuadrático medio en cada una de las direcciones y las frecuencias del espectro obtenidos para las boyas 42001 y 42040 en los instantes comprendidos entre 28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00 en intervalos de 6 horas.

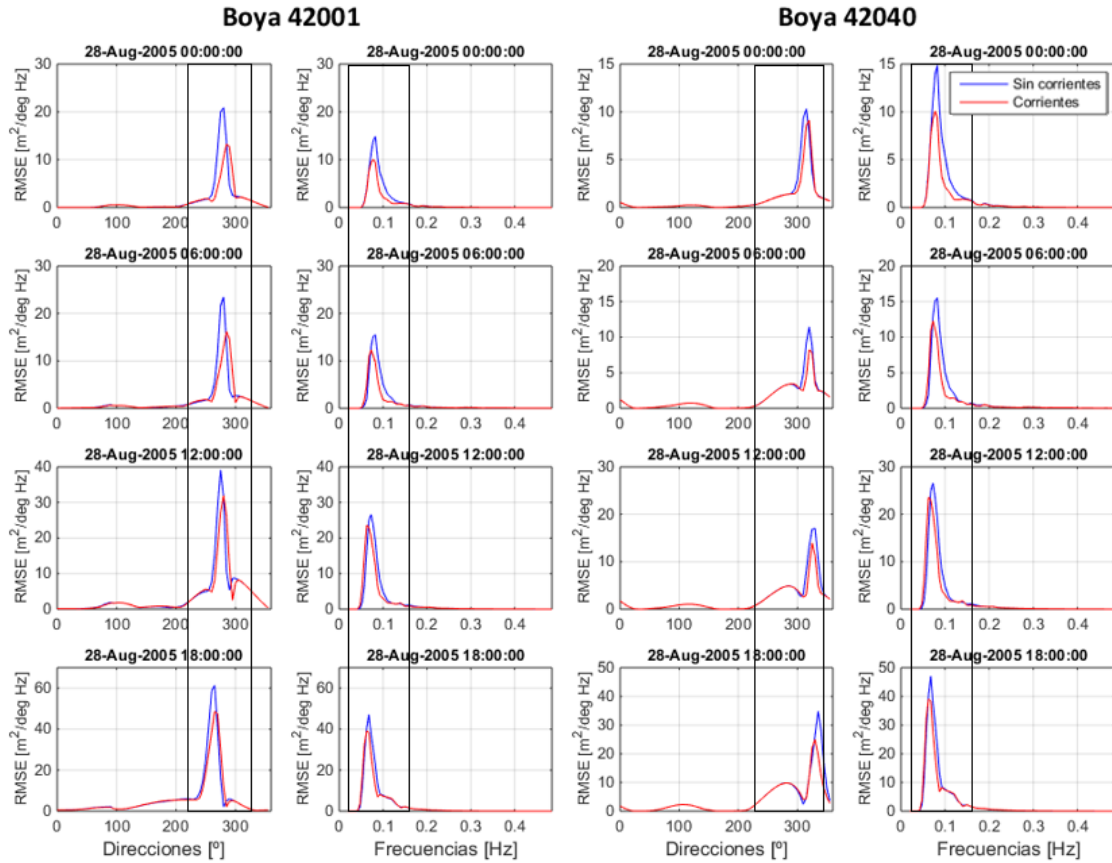


Figura 5-14.: Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Análisis del error cuadrático medio para cada dirección y cada frecuencia del espectro direccional de energía a partir de la ecuación 5-4. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42001, y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina.

El efecto de la interacción del campo de corrientes superficiales con el oleaje, presenta una mejor estimación del espectro direccional de energía al obtener un error cuadrático medio más bajo en comparación con los espectros medidos por las boyas 42001 y 42040 de la NOAA. Se observa que en los diferentes instantes de tiempo del huracán Katrina (28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00), la boya 42001 que se encuentra en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I) y la boya 42040 que se encuentra en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante II), presentan una disminución del error cuadrático medio (RMSE) en la estimación de los espectros de energía asociados a cada dirección (θ) y cada frecuencia (f). Además, se observa que los valores máximos del error cuadrático medio (RMSE) están asociados a la estimación de los valores donde se concentra la mayor cantidad de energía en el espectro direccional ($E(f, \theta)$) (ver Figuras 5-12 y 5-13). En el caso de la boya 42001, en los dos primeros instantes de tiempos analizados (28/08/2005 00:00:00 y 28/08/2005 06:00:00), el huracán es categoría 4 y la boya se ubica en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I). En la gráfica que corresponde a $RMSE(\theta)$, las simulaciones con y sin corrientes, presentan los valores máximos del RMSE en el rango de direcciones (250° hasta 310°). Al incluir el efecto de las corrientes hay una disminución de valor pico de $RMSE(\theta)$ y un incremento de la dirección pico (θ_p) asociada al valor máximo del $RMSE(\theta)$. En la mayoría de direcciones hay una disminución del RMSE. En la gráfica que corresponde a $RMSE(f)$, los valores máximos se presentan en el rango de frecuencias ($0,042 - 0,15 \text{ Hz}$), y al incluir el efecto las corrientes hay una disminución del valor pico de $RMSE(f)$ y una disminución de la frecuencia asociada al máximo valor del $RMSE(f)$. Las variaciones en el comportamiento del error cuadrático medio (RMSE) asociado a cada dirección (θ) y cada frecuencia (f), se deben a la redistribución de la energía en el espectro direccional al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente (ver Figura 5-10). En los instantes (28/08/2005 12:00:00 y 28/08/2005 18:00:00), el huracán alcanza la categoría 5 y se encuentra más cerca de la boya, generando oleaje con más energía, incrementando los valores máximos del error cuadrático medio en la estimación de los espectros asociados a cada dirección $RMSE(\theta)$. Se presentan un incremento del error cuadrático medio en el rango de direcciones (100° y 200°), en comparación con los dos primeros instantes, esto se observa en la figura 5-12, cuando el huracán está próximo a ubicarse en el cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV) el espectro medido por la boya presenta una distribución de la energía en este rango de direcciones. La gráfica que corresponde $RMSE(f)$, tiene un comportamiento similar a los dos instantes analizados, aunque con mayores valores del RMSE. Al incluir las corrientes hay una disminución del valor máximo y una disminución de la frecuencia asociada a este valor.

En el caso de la boya 42040, en los dos primeros instantes de tiempos analizados (28/08/2005 00:00:00 y 28/08/2005 06:00:00), la boya se ubica en la parte frontal derecha (cuadrante II) del huracán. En la gráfica que corresponde a $RMSE(\theta)$, las simulaciones con y sin corrientes, presentan los valores máximos del RMSE en el rango de direcciones (280° y 330°). Al incluir el efecto de las corrientes hay una disminución de valor pico de $RMSE(\theta)$ y un incremento de la dirección asociada al valor máximo valor del $RMSE(\theta)$. En la gráfica que corresponde a $RMSE(f)$, los valores máximos del RMSE se presentan en el rango de frecuencias ($0,042 - 0,15 \text{ Hz}$), y al incluir el efecto las corrientes hay una disminución del valor pico de $RMSE(f)$ y una disminución de la frecuencia asociada al máximo valor del $RMSE(f)$. En los instantes (28/08/2005 12:00:00 y 28/08/2005

18:00:00) se presentan un incremento del error cuadrático medio en el rango de direcciones (80° y 120°), en comparación con los dos primeros instantes, la componente de energía en esta dirección, se observa en la figura 5-13. La gráfica que corresponde $RMSE(f)$, tiene un comportamiento similar a los dos instantes analizados, aunque con mayores valores del RMSE. Al incluir las corrientes hay una disminución del valor máximo y una disminución de la frecuencia asociada a este valor.

Adicionalmente, se compara el RMSE de los valores que corresponden a cada pareja de datos de frecuencia y dirección (σ, θ) para el espectro modelado y el espectro medido por la boya de la NOAA (ecuación 5-5). La Figura 5-15 presenta el error cuadrático medio para todas las direcciones y todas las frecuencias usando la modelación espectral con interacción ola-corriente y los datos de las mediciones *in situ* de las boyas de la NOAA. Se realiza la comparación de los espectros para cada instante de tiempo del huracán (ver Figura 5-9), y para las diferentes boyas que tienen información disponible del espectro direccional de corrientes usando la ecuación 5-5.

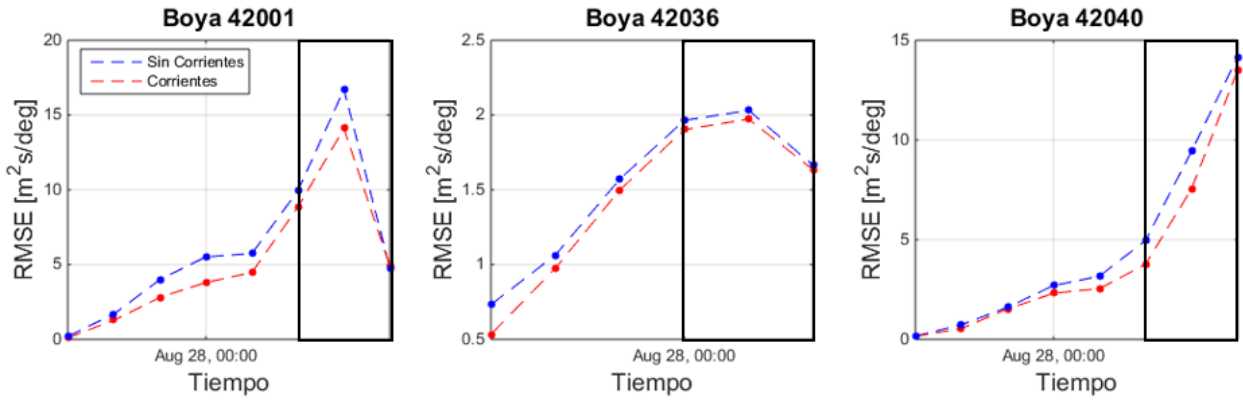


Figura 5-15.: Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42001, 42036 y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina.

De la Figura 5-15, se observa que al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación, se presenta una disminución del error cuadrático medio (RMSE) de la energía del espectro direccional en todos los instantes de tiempo analizados durante el paso del huracán Katrina, al comparar los espectros calculados con el modelo de oleaje (WWIII) con los espectros medidos por las boyas 42001, 42036 y 42040 de la NOAA (ver Figura 5-9). A partir de este resultado se concluye que considerar el campo de corrientes superficiales de AVISO en la simulación numérica en condiciones extremas de viento, durante el paso del huracán Katrina, presenta mejores resultados en la modelación de los espectros direccionales de energía $E(f, \theta)$, acercando la simulación a los datos medidos por las boyas. Las valores máximos del RMSE que se presentan en la estimación del error cuadrático medio de los espectros direccionales de energía $E(f, \theta)$, ocurren cuando el huracán está más próximo a la ubicación de la boya. En el caso de la boya 42001, en el primer instante de tiempo analizado (27/08/2005 06:00:00) el huracán es categoría 2 y la boya se ubica en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante II) a una distancia de 651 kilómetros. El RMSE que se obtiene para este instante es cercano a cero para las simulaciones con y sin corrientes, esto se debe a que el oleaje presenta baja energía, lo cual se observa en la magnitud de la energía en el espectro de frecuencias

para esta fecha (ver figura 5-2). A medida que el huracán avanza, incrementando de categoría y disminuyendo la distancia con respecto a la boya (27/08/2005 18:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00), aumenta el valor del error cuadrático medio. En este instante (28/08/2005 18:00:00), el huracán presenta categoría 5 y se encuentra más cerca a la ubicación de la boya, la cual está ubicada en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán, presentando el máximo valor del RMSE ($17 [m^2/degH_z]$), y al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en la simulación, hay una disminución del RMSE ($14.5 [m^2/degH_z]$) lo que corresponde a una disminución del 17 %. A partir de este instante (29/08/2005 00:00:00) la categoría del huracán empieza a descender y la boya se ubica en la parte trasera izquierda (cuadrante IV) del huracán, disminuyendo el valor del error cuadrático medio para ambas simulaciones, en comparación con el espectro medido. Con respecto a la boya 42036, en el primer instante (27/08/2005 06:00:00) el huracán es categoría 2 y se encuentra a una distancia de 732 kilómetros de la boya, la cual se ubica en el cuadrante frontal derecho (cuadrante II). En este instante se presenta el menor valor de RMSE, y la mayor diferencia porcentual al incluir el campo de corrientes superficiales, al disminuir un 46 % el valor del RMSE. A medida que el huracán incrementa de categoría (27/08/2005 12:00:00 hasta 28/08/2005 00:00:00), reduciendo la distancia respecto a la boya, la cual se ubica en el cuadrante trasero derecho (cuadrante III), se presenta un incremento de la magnitud del RMSE, y el efecto de las corrientes reduce la magnitud del RMSE alrededor del 20 %. En el instante (28/08/2005 06:00:00) el huracán es categoría 4 y se encuentra más cerca de la boya, a una distancia de 394 kilómetros, presentando el valor máximo de RMSE ($2.05 [m^2/degH_z]$), el cual disminuye al incluir el efecto de las corrientes ($1.92 [m^2/degH_z]$), lo que corresponde a una variación del 7 %. En el caso de la boya 42040, en el primer instante, la boya se encuentra a una distancia de 864 kilómetros, presentando valores de RMSE cercanos a cero, el huracán incrementa de categoría y se acerca a la boya, produciendo un incremento del RMSE, hasta llegar al instante (29/08/2005 00:00:00), en el cual el huracán es categoría 5 y se encuentra a una distancia de 248 kilómetros. En este instante presentan una disminución del error cuadrático medio del 6 %, lo que equivale a una disminución del RMSE de 14,3 a 13,9 $[m^2/degH_z]$.

El incremento del RMSE para los espectros direccionales con y sin corrientes, durante los instantes de tiempo en que el huracán se encuentra más próximo a la boya, se debe a que la solución obtenida con el modelo concentra la energía en una región más pequeña del espectro. Esto implica que al hacer la comparación con las mediciones de la boya, para cada punto del espectro (f, θ) , se dan casos en que la energía es máxima en el espectro modelado, mientras que es mínima en el espectro medido, o el caso contrario, donde el modelo presenta valores mínimos de energía, el espectro medido por la boya presenta valores máximos, lo que genera un incremento del error cuadrático medio.

En general, de las Figuras 5-14 y 5-15 se concluye que al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en el modelo de oleaje (WWIII), se presenta una mejor estimación del espectro direccional de energía $(E(f, \theta))$, al reducir el error cuadrático medio en la mayoría de instantes de tiempo analizados, presentando una disminución del RMSE que va hasta 46 %. Lo que indica que el efecto de la interacción ola-corriente permite obtener una mejor precisión, por tanto, una mejor estimación de los espectros de energía $(E(f))$ y $E(f, \theta)$ y de los parámetros escalares del oleaje $(H_s, T_p$ y $\theta_p)$, durante el paso del huracán Katrina.

5.2.2. Huracán Rita

El mismo análisis de la sección anterior se repite para el Huracán Rita. La Figura 5-16 presenta el efecto de la interacción ola-corriente en la estimación del espectro direccional de energía del oleaje ($E(f, \theta)$), y la diferencia con la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes ($E(f, \theta)_{Corrientes} - E(f, \theta)_{SinCorrientes}$). Se presentan los resultados obtenidos para los instantes de tiempo 22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. En estos instantes de tiempo, el huracán alcanza la categoría 5. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42001 de la NOAA. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

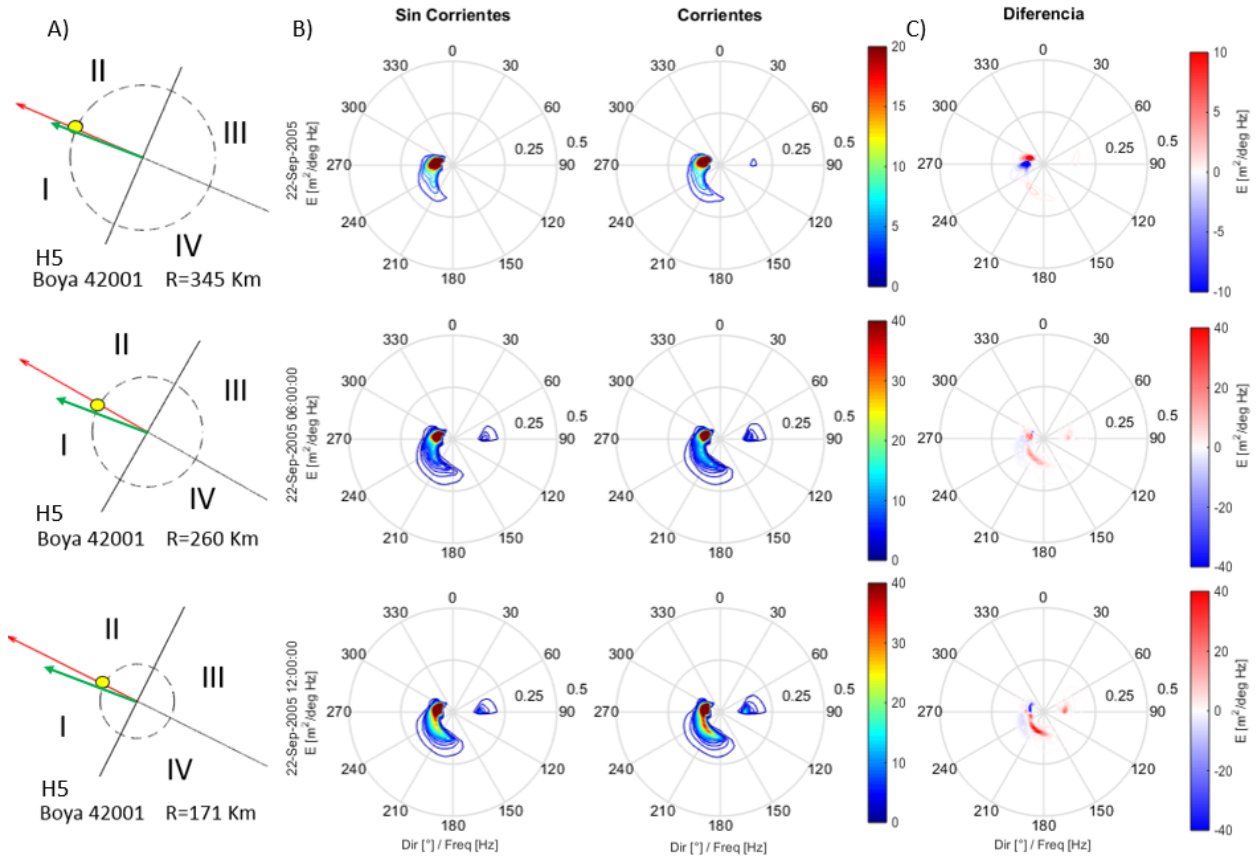


Figura 5-16.: Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42001 de la NOAA, para las fechas 22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

La Figura 5-17 presenta la solución obtenida del espectro direccional de energía del oleaje con y sin la interacción ola-corriente. Se presentan la solución obtenida para los instantes 22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. En estos instantes de tiempo, el huracán alcanza la categoría 5. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42040 de la NOAA. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

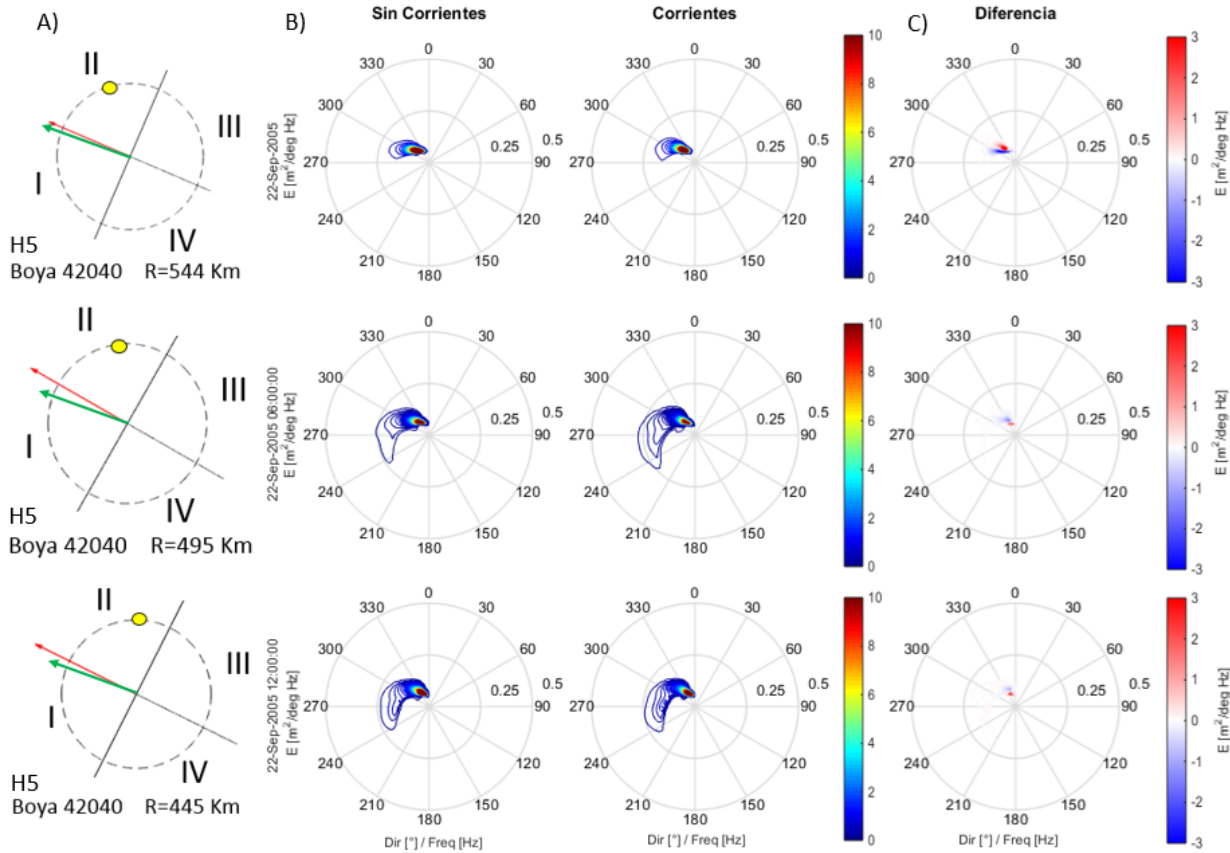


Figura 5-17.: Efecto de la interacción ola-corriente en el espectro direccional de energía. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Diferencia entre el espectro con corrientes y el espectro sin corrientes. Se analizan los resultados en la boya 42040 de la NOAA, para las fechas 22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

El campo de corrientes superficiales de AVISO produce una redistribución de la energía en el espacio espectral de frecuencias (f) y direcciones (θ), durante todos los instantes analizados del paso del huracán Rita. En el caso de la boya 42001, se analiza el comportamiento del espectro direccional en los instantes en que el huracán alcanza la categoría 5. Los análisis de los espectros para ambas modelaciones con corrientes y sin corrientes muestran que en los instantes analizados (22/09/2005 00:00:00, 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00) cuando la boya está ubicada en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II), el comportamiento del espectro direccional concentra los valores máximos de energía en un rango de direcciones entre 240° y 300° . Además, se presenta

una componente en la dirección 90° de baja energía. En el espectro que presenta las diferencias de magnitud de la energía entre la simulación con corrientes y la simulación sin corrientes se observa que en el primer instante (ver 22/09/2005 00:00:00) hay una redistribución de la energía hacia las bajas frecuencias ($< 0,15 \text{ Hz}$), mientras que en los instantes (ver 22/09/2005 06:00:00 y 22/09/2005 12:00:00) se presenta una redistribución de la energía a frecuencias más altas, y una mayor dispersión direccional, presentando un incremento de energía en el rango de direcciones 180° hasta 240° . En los instantes de tiempo analizados la dirección de las corrientes (flecha verde) coincide con la dirección en la que se concentra la mayor parte de la energía en el espectro (aproximadamente 270°). Este efecto, produce una disminución de la energía, lo que implica una disminución de la altura de ola significativa (H_s) (ver Figuras 4-20 y 4-21).

En el caso de la boya 42040, en los tiempos analizados el huracán es categoría 5 y la boya se ubica en la parte frontal derecha (cuadrante II). En este cuadrante se observa que la dirección que presenta el oleaje coincide con la dirección de traslación del huracán, esto concuerda con los resultados obtenidos por Moon et al. (2003) y Montoya et al. (2013) en la modelación espectral del oleaje en condiciones extremas de huracán. Se observa también que al estar ubicado en la parte derecha del huracán (cuadrante II) el comportamiento del espectro direccional de energía presenta un comportamiento unimodal (Hu & Chen, 2011; Bennett & Mulligan, 2017), donde los valores máximos de energía se concentran en un solo rango de frecuencias. En los instantes de tiempo analizados la dirección de las corrientes (flecha verde) coincide con la dirección en la que se concentra la mayor energía del espectro, lo que genera una disminución de la energía del oleaje, y por ende una disminución de la altura de ola significativa (ver Figuras 4-20 y 4-21). En el espectro que indica las diferencias entre la simulación con y sin corrientes, se observa que, en los tres instantes de tiempo, el efecto de la corrientes produce un cambio de la dirección del oleaje y un cambio en la energía en las bajas frecuencias, a pesar de no ser significativo el cambio que se presenta.

En general, al incluir el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, se presenta una redistribución de la energía hacia las bajas frecuencias ($< 0,15 \text{ Hz}$) y una variación de la dirección pico (θ_p), para las boyas 42001 y 42040. Las máximas diferencias positivas y negativas en la estimación de los espectros direccionales de energía ($E(f, \theta)$), se presentan cuando el huracán está más próximo a la boya. Se observa que el espectro direccional presenta mayor energía, y por ende mayores diferencias, para la boya 42001 en comparación con los resultados obtenidos para boya 42040, lo cual se debe a la ubicación con respecto a la dirección de traslación y el centro del huracán.

La Figura 5-18 presenta la comparación de la solución obtenida del espectro direccional con el modelo y los espectros medidos por las boyas de la NOAA. Se presentan las soluciones obtenidas para los instantes 23/09/2005 00:00:00, 23/09/2008 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42036. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

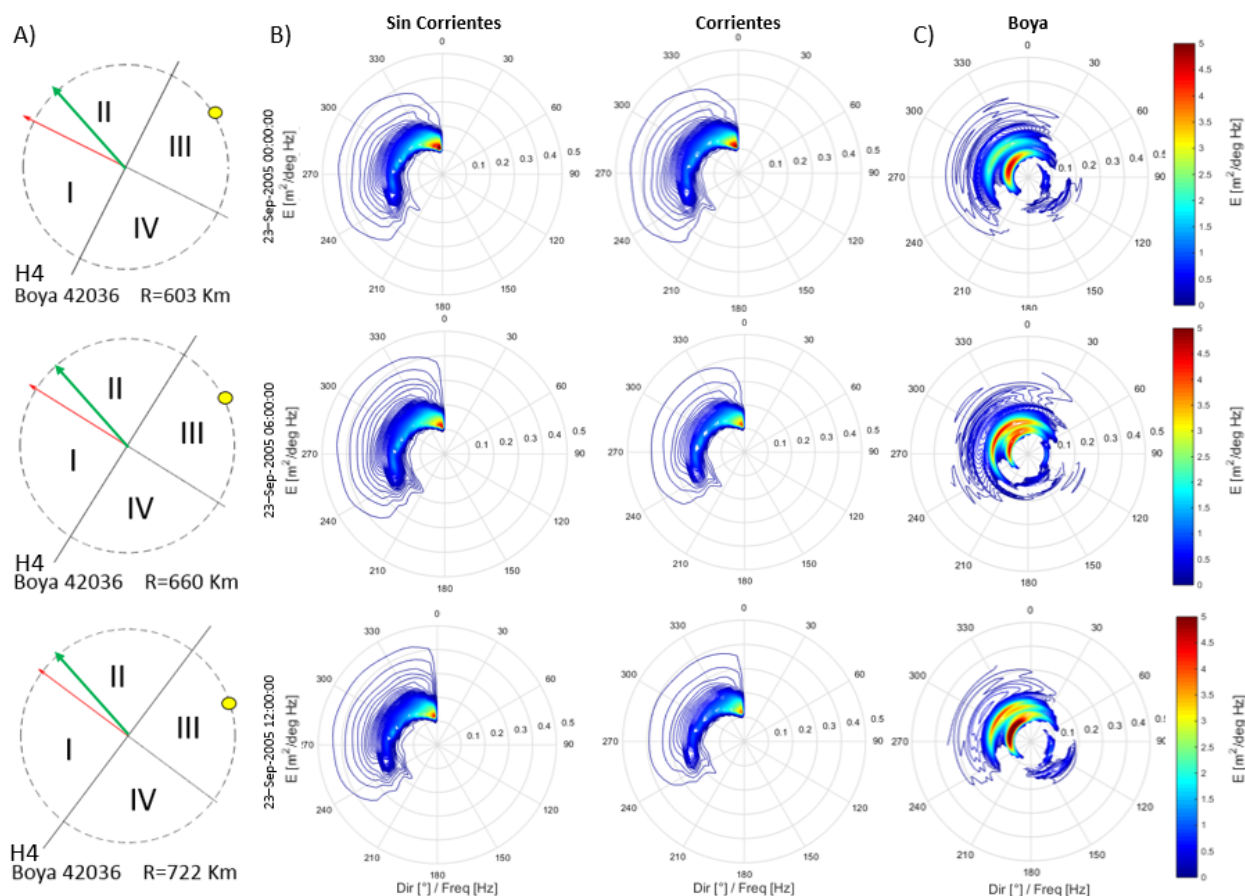


Figura 5-18.: Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42036 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 23/09/2005 00:00:00, 23/09/2005 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

La Figura 5-19 presenta la comparación de la solución obtenida del espectro direccional con el modelo y los espectros medidos por las boyas de la NOAA. Se presentan las soluciones obtenidas para los instantes 23/09/2005 00:00:00, 23/09/2005 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42040 de la NOAA. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

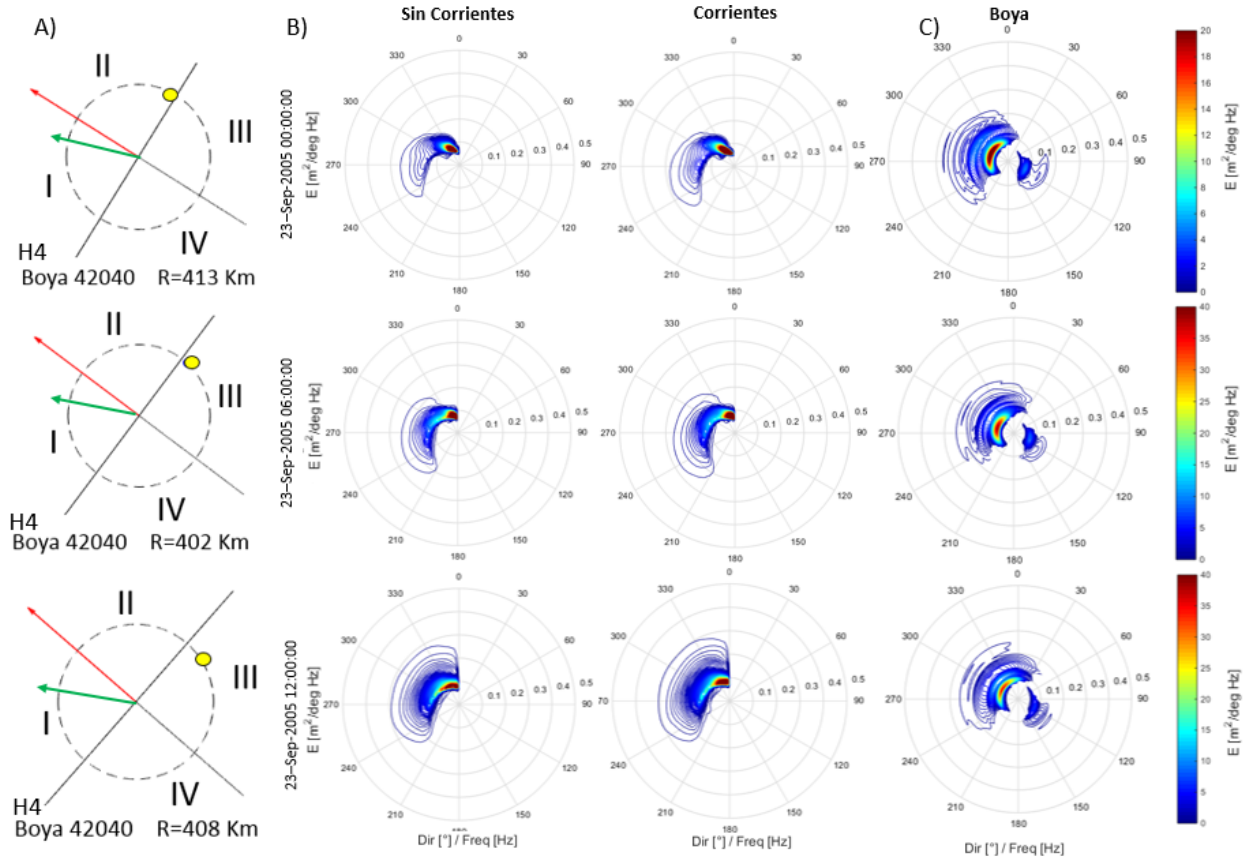


Figura 5-19.: Comparación del espectro direccional modelado y las mediciones del espectro de la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. (A) Ubicación y distancia de la boya de estudio, con respecto al ojo del huracán. (B) Espectros direccionales modelados con y sin corrientes. (C) Espectro direccional medido por la boya. Se analizan las fechas 23/09/2005 00:00:00, 23/09/2005 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00. La flecha roja indica la dirección de traslación del huracán y la flecha verde la dirección de las corrientes.

De las Figuras 5-18 y 5-19, se observan diferencias en la distribución de la energía en los espectros direccionales calculados con el modelo de oleaje (WWIII) y los espectros medidos por las boyas 42036 y 42040 de la NOAA. El espectro que se obtiene a partir de la modelación numérica con y sin corrientes ($E(f, \theta)$), distribuye la energía en un rango de frecuencias similar a los espectros medidos por las boyas. En el caso de la boya 42036, en los instantes de tiempo (23/09/2005 00:00:00, 23/09/2005 06:00:00 y 23/09/2005 12:00:00), el huracán es categoría 4 y se encuentra a una distancia mayor de 600 kilómetros de la boya. En estos instantes la boya está ubicada en la parte trasera derecha (cuadrante III) del huracán. Se observa que el modelo concentra la energía en una dirección (aproximadamente 350°), mientras que el espectro medido presenta una mayor dispersión direccional, en un rango de direcciones entre 270° y 350° , donde se concentran los valores máximos de energía. El espectro modelado presenta una distribución de los valores máximos en las bajas frecuencias ($< 0,15 \text{ Hz}$), y concentra la energía alrededor de una frecuencia pico, mientras que el espectro medido por la boya distribuye los valores máximo de energía en un rango mayor de frecuencias ($0,042 - 0,25 \text{ Hz}$), concentrando los valores máximos de energía alrededor de dos valores de frecuencia. En el caso de la boya 42040, el modelo representa adecuadamente las direcciones en las que se concentra la mayor energía de la ola (aproximadamente 330°), sin embargo sobrestima

los valores máximos de energía, y presenta una menor dispersión con respecto al espectro medido. Se observa además que en los espectros medidos hay una componente en la dirección 120° , que el modelo no representa, y que en algunas situaciones puede estar asociado a la precisión de las mediciones y a los métodos empleados para generar el espectro direccional de energía medido por la boya (Montoya et al., 2013).

Las diferencias entre el espectro con y sin corrientes, calculado con el modelo de oleaje (WWIII) y el espectro medidos por las boyas de la NOAA, se estiman calculando el error cuadrático medio (RMSE). Para una mejor visualización de la información. La Figura 5-20 presenta el error cuadrático medio que se obtiene a partir de los resultados de la modelación espectral incluyendo el efecto de la interacción ola-corriente y los datos de las mediciones *in situ* de las boyas. En el gráfico se analiza el comportamiento del error cuadrático medio en cada una de las direcciones y las frecuencias del espectro de energía a partir de las ecuación 5-4.

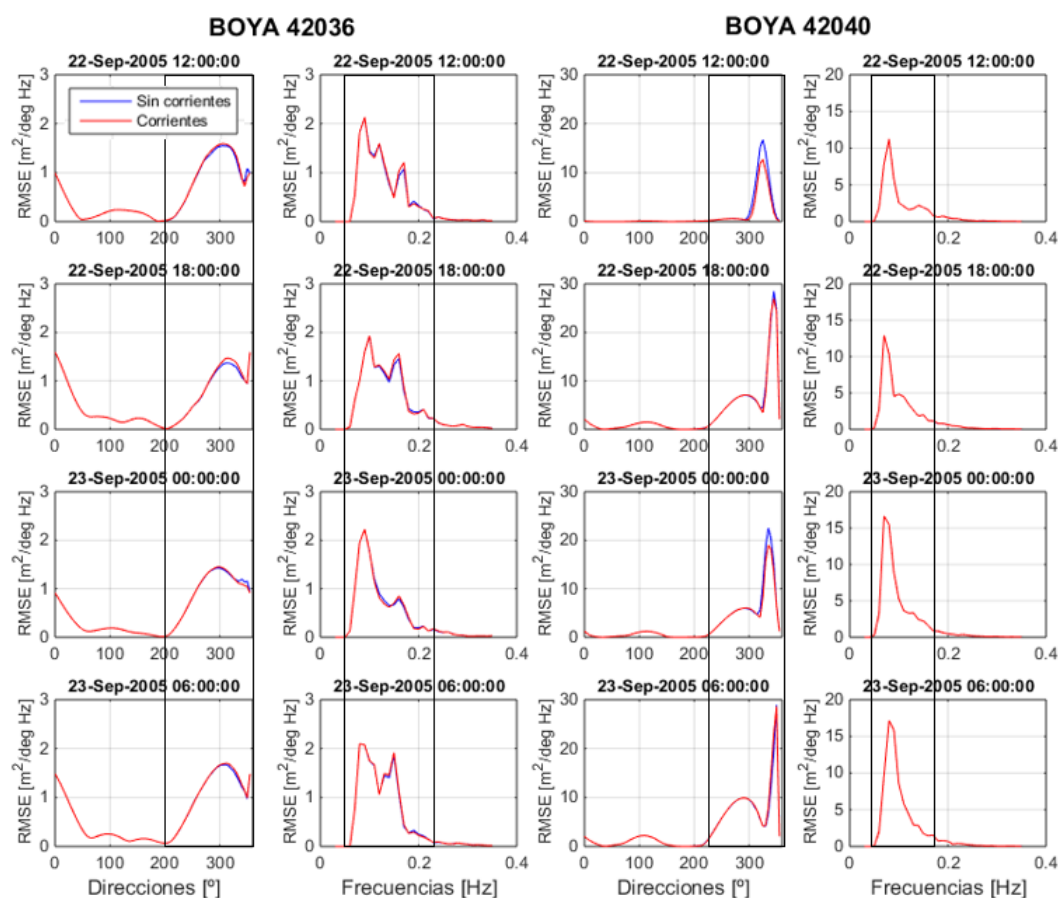


Figura 5-20.: Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Análisis del error cuadrático medio para cada dirección y cada frecuencia del espectro direccional de energía. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42036, y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Los recuadros negros indican los rangos de frecuencia y dirección donde se concentra la mayor energía del espectro.

En el caso del huracán Rita, el efecto de las corrientes superficiales de AVISO, presenta una mejor estimación del espectro direccional de energía del oleaje al obtener un error cuadrático medio más bajo, tomando como referencia las medidas de las boyas 42036 y 42040. A diferencia del huracán Katrina, la variación en el espectro direccional de energía al tener en cuentas las corrientes es menor. Esto posiblemente se deba a la ubicación de la boya con respecto a la dirección de traslación del huracán y el centro de la tormenta. En el caso de la boya 42036 se observa que los valores máximos del error cuadrático medio (RMSE) con y sin corrientes, están asociados a la estimación de los valores donde se concentra la mayor cantidad de energía en el espectro. En los dos primeros instantes de tiempos (22/09/2005 12:00:00 y 22/09/2005 18:00:00), el huracán es categoría 5 y la boya se ubica en la parte trasera izquierda (cuadrante III) del huracán, se observa que la energía se concentra entre (0° - 50° y 200° y 360°), y que el efecto de la interacción ola-corriente no produce un cambio significativo en el cálculo del error cuadrático medio $RMSE(\theta)$. Similarmente, en la gráfica que corresponde a $RMSE(f)$, se observa que las simulaciones con y sin corrientes, presentan un comportamiento similar, distribuyendo el RMSE en un rango mayor de frecuencias ($0,042$ - $0,2$ Hz). En los instantes (23/08/2005 00:00:00 y 23/08/2005 06:00:00), el huracán disminuye a categoría 4, y el comportamiento de $RMSE(\theta)$ y $RMSE(f)$ no presentan variaciones significativas en comparación a los dos instantes analizados anteriormente. En el caso de la boya 42040, en los dos primeros instantes de tiempos analizados (22/09/2005 12:00:00 y 22/09/2005 18:00:00), la boya se ubica en la parte frontal derecha (cuadrante II) del huracán. En la gráfica que corresponde a $RMSE(\theta)$, las simulaciones con y sin corrientes, presentan valores máximos del RMSE en el rango de direcciones (280° y 360°). Al incluir el efecto de las corrientes hay una disminución del valor pico de $RMSE(\theta)$. En la gráfica que corresponde a $RMSE(f)$, los valores máximos del RMSE se presentan en el rango de frecuencias ($0,042 - 0,2$ Hz), y al incluir el efecto de las corrientes no se presenta variación en el comportamiento del $RMSE(f)$. En los instantes (23/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 06:00:00) se presenta un incremento del error cuadrático medio en los rangos de direcciones (80° - 120° y 220° - 320°), en comparación con los dos primeros instantes, la componente de energía en esta dirección, se observa en la figura 5-19. La gráfica que corresponde $RMSE(f)$, tiene un comportamiento similar a los dos instantes analizados, aunque con mayores valores del RMSE. Al incluir las corrientes se presenta una disminución del valor máximo y una disminución de la frecuencia asociada a este valor.

La Figura 5-21 presenta la comparación de los resultados obtenidos con la modelación de los espectros direccionales y los espectros medidos por las boyas de la NOAA, a partir de la ecuación 5-5. Se presentan las soluciones obtenidas para los instantes 28/08/2005 00:00:00, 28/08/2008 06:00:00 y 28/08/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. Los datos corresponden a la solución obtenida en el punto donde está ubicada la boya 42040 de la NOAA.

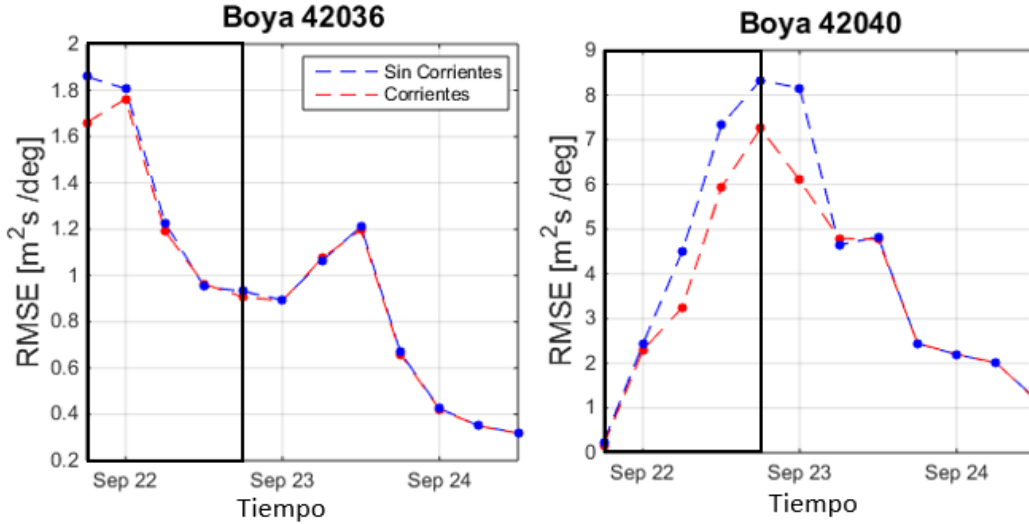


Figura 5-21.: Error cuadrático medio del espectro direccional de energía. Se comparan los espectros direccionales modelados con los datos medidos por las boyas 42036 y 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita.

De la Figura 5-21, se observa que al incluir el efecto de las corrientes, se presenta una disminución del error cuadrático medio (RMSE) de la energía del espectro direccional en la mayoría de los instantes analizados durante el paso del huracán Rita, al comparar los espectros calculados con el modelo de oleaje (WWIII) con los espectros medidos por las boyas 42036 y 42040 de la NOAA (ver Figura 5-9). A partir de este resultado se concluye que considerar el campo de corrientes superficiales de AVISO en la simulación numérica en condiciones extremas de viento, durante el paso del huracán Rita, presenta mejores resultados en la modelación de los espectros direccionales de energía $E(f, \theta)$, acercando la simulación a los datos medidos por las boyas. En comparación con los resultados obtenidos durante el paso del huracán Katrina, se observa que el efecto de las corrientes superficiales, produce menos cambios en el espectro direccional de energía, lo cual se debe a la ubicación de las boyas respecto a la dirección de traslación y la distancia al ojo del huracán. Los valores máximos que se presentan en la estimación del error cuadrático medio de los espectros direccionales de energía $E(f, \theta)$, ocurre cuando el huracán está más próximo a la ubicación de la boya. En el caso de la boya 42036, en el primer instante (21/09/2005 18:00:00), el huracán presenta categoría 5 y se encuentra más cerca la ubicación de la boya, a una distancia de 872 kilómetros, la cual está ubicada en la parte frontal derecha (cuadrante II) del huracán, presentando el máximo valor del RMSE ($1.84 [m^2/^\circ H_z]$), y al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en la simulación, hay una disminución del RMSE ($1.63 [m^2/^\circ H_z]$) lo que corresponde a una disminución del 13%. A partir de este instante (22/09/2005 00:00:00) la categoría del huracán empieza a descender y la boya se ubica en la parte trasera derecha (cuadrante III) del huracán, disminuyendo el valor del error cuadrático medio para ambas simulaciones. En estos instantes el efecto de la interacción ola-corriente no produce un cambio significativo en el valor del RMSE. Con respecto a la boya 42040, en el primer instante (21/09/2005 18:00:00) el huracán es categoría 5 y se encuentra a una distancia de 534 kilómetros de la boya, la cual se ubica en el cuadrante frontal derecho (cuadrante II). En este instante se presentan valores del RMSE cercanos a cero. A medida que el huracán avanza en la máxima categoría (22/09/2005 00:00:00 hasta 22/09/2005 12:00:00), reduciendo la

distancia respecto a la boya, la cual se ubica en el cuadrante trasero derecho (cuadrante III), se presenta un incremento de la magnitud del RMSE, y el efecto de las corrientes reduce la magnitud del RMSE alrededor del 20 %. En el instante (22/09/2005 18:00:00) el huracán es categoría 4 y se encuentra más cerca de la boya, a una distancia de 413 kilómetros, presentando el valor máximo de RMSE ($8.3 [m^2/^\circ H_z]$), el cual disminuye al incluir el efecto de las corrientes ($7.2 [m^2/^\circ H_z]$), lo que corresponde a una variación del 15 %. A partir de este instante el huracán disminuye de categoría (23/09/2005 00:00:00 - 24/09/2005 12:00:00), y el efecto de las corrientes, no produce cambios significativos en el valor del RMSE.

En general, de las Figuras 5-14 y 5-15 se concluye que al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en el modelo de oleaje (WWIII), se presenta una mejor estimación del espectro direccional de energía ($E(f, \theta)$), al reducir el error cuadrático medio en la mayoría de instantes de tiempo analizados, presentando una disminución del RMSE que va hasta 34 %. Lo que indica que el efecto de la interacción ola-corriente permite obtener una mejor estimación de los espectros de energía ($E(f)$ y $E(f, \theta)$) y de los parámetros escalares del oleaje (H_s , T_p y θ_p), durante el paso del huracán Rita.

En el caso del espectro escalar de frecuencias se obtuvo una disminución del error cuadrático medio alrededor del 40 % (en comparación con modelos sin interacción ola-corriente) durante el paso del huracán Katrina, y 65 % durante el paso del huracán Rita. En el caso del espectro direccional de energía, se presentan mejorías en el error cuadrático medio con disminuciones de hasta 46 %, durante el paso del huracán Katrina, y 34 % en el caso del huracán Rita. Estas diferencias dependen de la ubicación de la boya con respecto a la dirección de traslación y distancia al ojo del huracán. Se concluye entonces que es importante tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente durante condiciones extremas de vientos de huracán para obtener una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias $E(f)$ y del espectro direccional de energía del oleaje $E(f, \theta)$.

5.3. Espectro direccional de energía en los cuadrantes del huracán

El espectro direccional de energía $E(f, \theta)$ varía en el tiempo y en el espacio, presentando un comportamiento diferente en cada uno de los cuatro cuadrantes del huracán. Dependiendo de la ubicación relativa respecto al centro de la tormenta y la dirección de traslación del huracán, se presentan diferentes distribuciones de energía en frecuencias y direcciones (Moon et al., 2003; Zhou et al., 2008; Montoya et al., 2013; Chen et al., 2013; Bennett & Mulligan, 2017). En la investigación desarrollada por Hu & Chen (2011), sugieren que los espectros generados por los huracanes son típicamente unimodales, con algunos espectros bimodales en regiones geográficas específicas en relación con el ojo del huracán. Se definen los cuatro cuadrantes del huracán a partir de la dirección de traslación del huracán, de la siguiente forma: Cuadrante frontal izquierdo (cuadrante I), cuadrante frontal derecho (cuadrante II), cuadrante trasero derecho (cuadrante III) y cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV). De esta forma, en esta sección se estudia el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del espectro direccional de energía $E(f, \theta)$ en cada uno de los cuatro cuadrantes, en los instantes de tiempo que el huracán desarrolla las máximas velocidades de viento, que representan las condiciones de mayor energía, generando olas más grandes. Las simulaciones se realizan teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, y el campo de vientos combinado de huracán HURNARR. Finalmente, se estudia el comportamiento de los parámetros escalares (H_s , T_p) y espectros de energía del oleaje ($E(f)$, $E(\theta)$, $E(f, \theta)$), definiendo boyas virtuales a 100 kilómetros del ojo del huracán en cada uno de los cuatro cuadrantes.

La Figura 5-22 presenta la dirección del huracán (flecha roja), la nomenclatura usada para definir los cuatro cuadrantes y la ubicación de las boyas virtuales, en las que se estudia el comportamiento del espectro direccional de energía. Los resultados se obtienen para los instantes de tiempo 28/08/2005 00:00:00 (huracán categoría 3), 28/08/2005 06:00:00 (huracán categoría 4) y 28/08/2005 12:00:00 (huracán categoría 5).

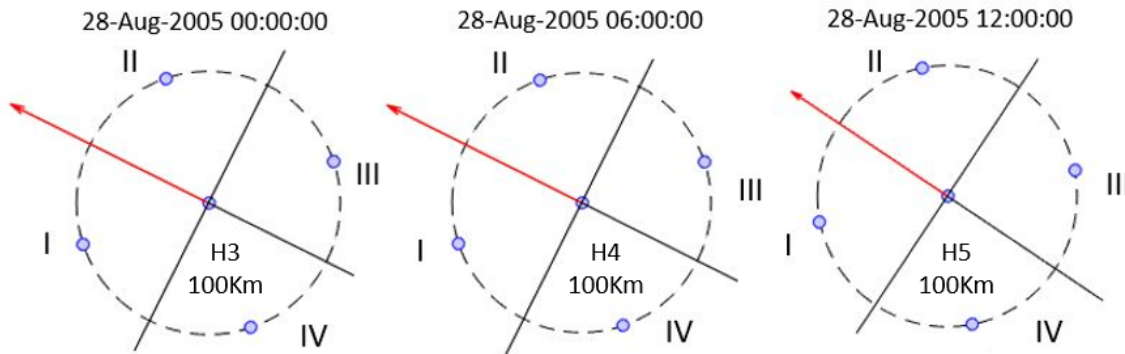


Figura 5-22.: Ubicación de los espectros por cuadrante. Se tienen en cuenta los instantes de tiempo

La Figura 5-23 presenta el efecto de la interacción ola-corriente en el espectro de frecuencias $E(f)$, en el espectro de direcciones $E(\theta)$ y en el espectro direccional de energía $E(f, \theta)$, en las boyas virtuales definidas en cada uno de los cuatro cuadrantes. Se realiza una comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones con y sin corriente, además se presenta el valor obtenido de los parámetros escalares de periodo pico (T_p) y altura de ola significativa (H_s), calculados a partir del espectro escalar de frecuencias modelado. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Los resultados corresponden a la fecha 28/08/2005 00:00:00, donde el huracán Katrina presenta categoría 3.

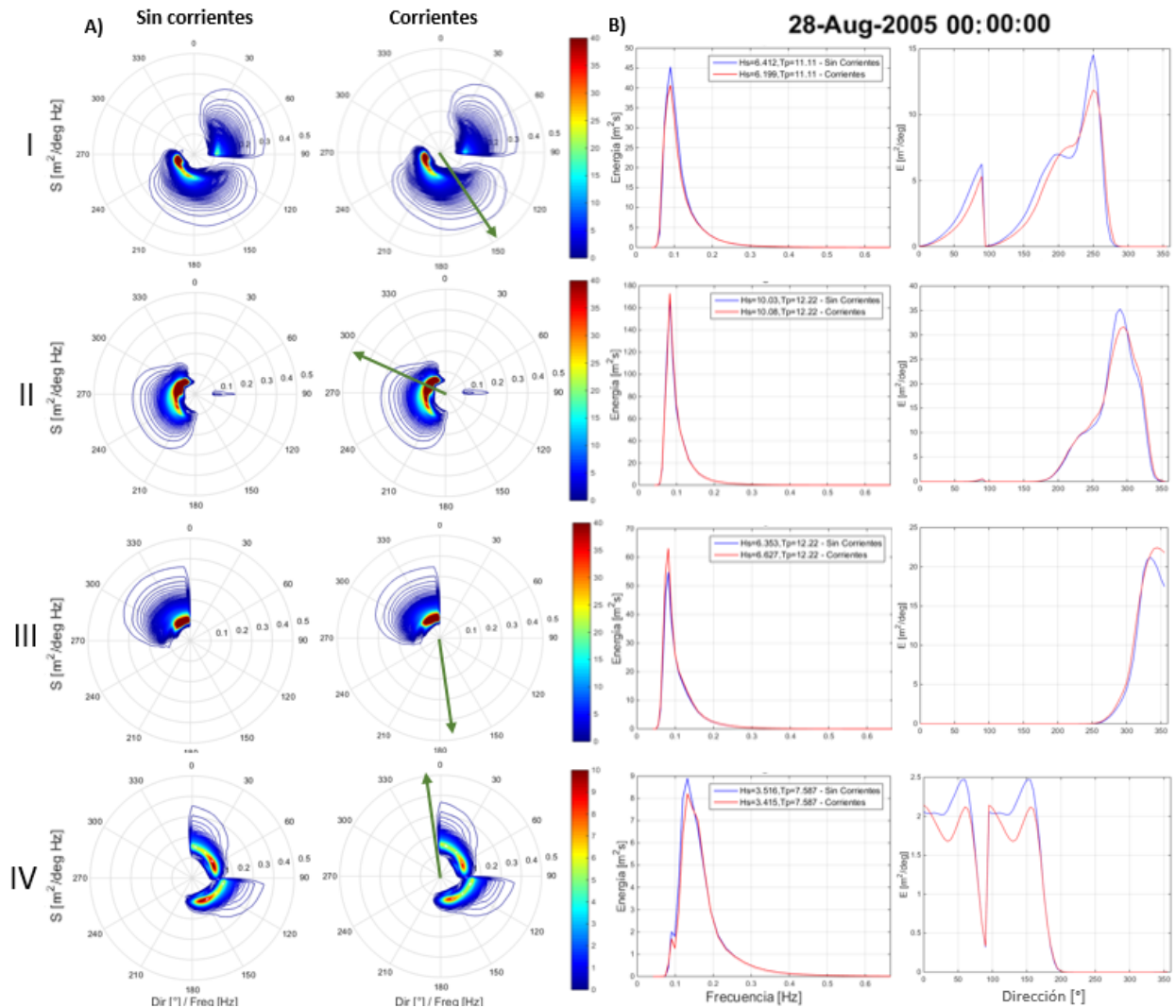


Figura 5-23.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los espectros de energía por cuadrante. (A) Espectros direccionales de energía modelados con y sin corrientes, en cada cuadrante del huracán. (B) Espectro escalar de frecuencias, espectro de direcciones y parámetros escalares del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 00:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina. La flecha verde indica la dirección de las corrientes.

Las Figura 5-24 presenta el efecto de la interacción ola-corriente en el espectro de frecuencias $E(f)$, espectro de direcciones $E(\theta)$ y en el espectro direccional de energía $E(f, \theta)$, en las boyas virtuales definidas en cada uno de los cuatro cuadrantes. Se realiza una comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones con y sin corriente, además se presenta el valor obtenido de los parámetros escalares de periodo pico (T_p) y altura de ola significativa (H_s), calculados a partir del espectro escalar de frecuencias. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Los resultados corresponden a la fecha 28/08/2005 06:00:00, donde el huracán Katrina presenta categoría 4.

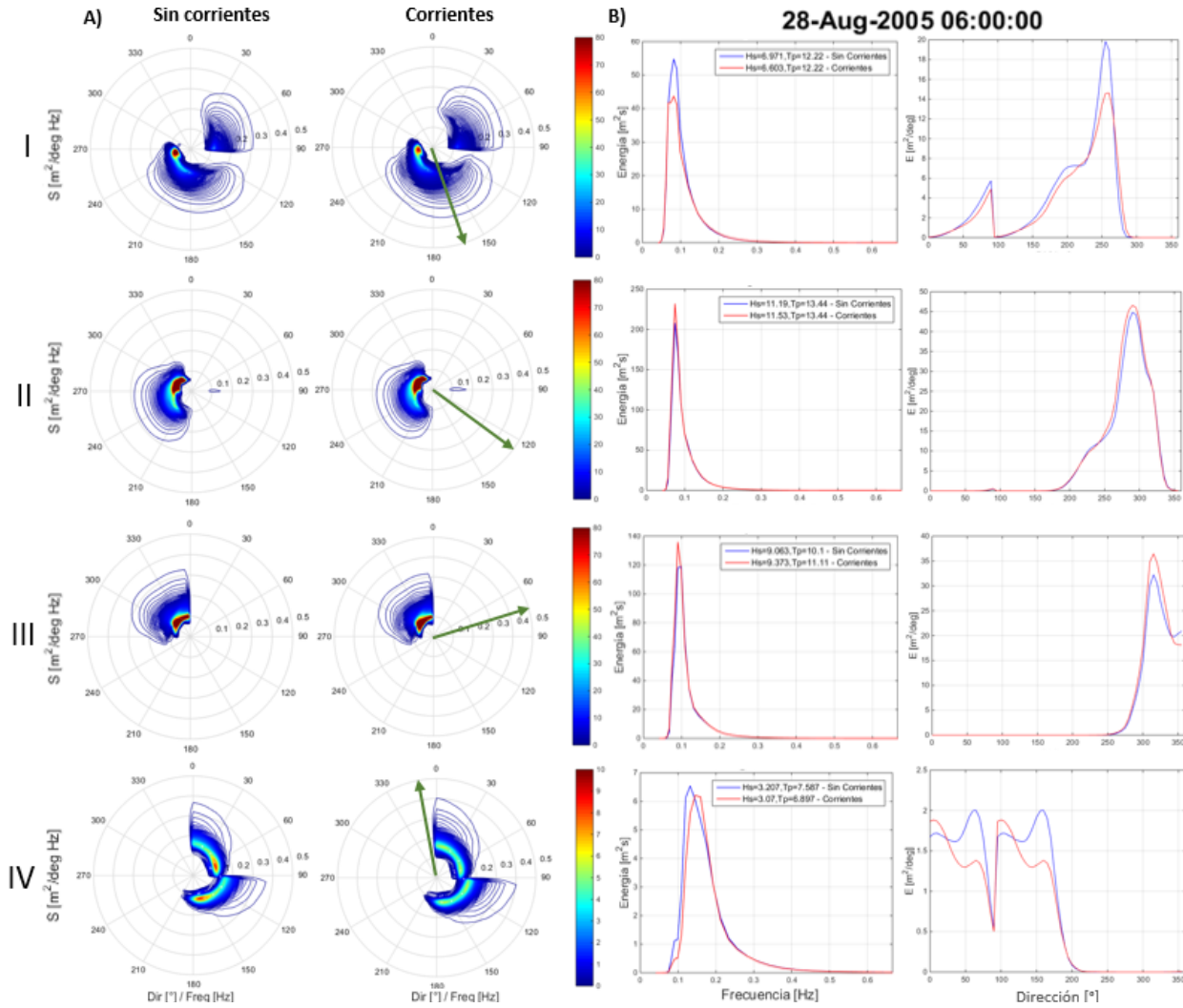


Figura 5-24.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los espectros de energía por cuadrante. (A) Espectros direccionales de energía modelados con y sin corrientes, en cada cuadrante del huracán. (B) Espectro escalar de frecuencias, espectro de direcciones y parámetros escalares del oleaje. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 06:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina.

Las Figura 5-25 presenta el efecto de la interacción ola-corriente en el espectro de frecuencias $E(f)$, espectro de direcciones $E(\theta)$ y en el espectro direccional de energía $E(f, \theta)$, en las boyas virtuales definidas en cada uno de los cuatro cuadrantes. Se realiza una comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones con y sin corriente, además se presenta el valor obtenido de los parámetros escalares de periodo pico (T_p) y altura de ola significativa (H_s), calculados a partir del espectro escalar de frecuencias. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Los resultados corresponden a la fecha 28/08/2005 12:00:00, donde el huracán Katrina alcanza la categoría 5.

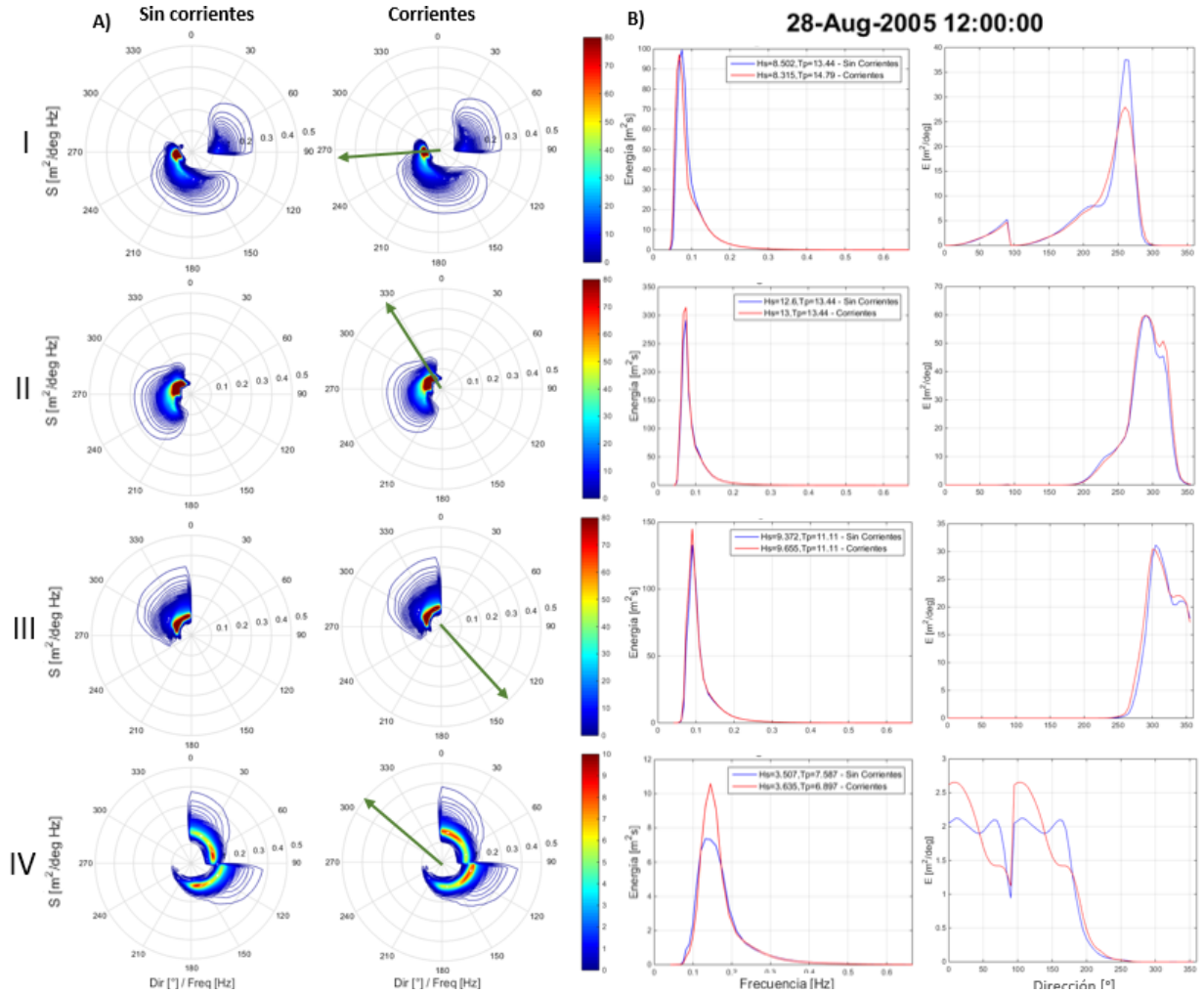


Figura 5-25.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los espectros de energía por cuadrante. (A) Espectros direccionales de energía modelados con y sin corrientes, en cada cuadrante del huracán. (B) Espectro escalar de frecuencias, espectro de direcciones y parámetros escalares del oleaje. La flecha verde indica la dirección de las corrientes. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 12:00:00, que corresponde al paso del Huracán Katrina.

El espectro direccional de energía varía en cada uno de los cuadrantes del huracán, presentando diferentes distribuciones de energía en frecuencias y direcciones. Se observa que los cuadrantes ubicados en la parte derecha del huracán (cuadrantes II y III) son los más energéticos, mientras que los cuadrantes ubicados en la parte izquierda del huracán (Cuadrantes I y IV), presentan menor energía. Este comportamiento del espectro direccional obtenido con las simulaciones con y sin corrientes, concuerdan con los resultados obtenidos por Hu & Chen (2011) y Bennett & Mulligan (2017), los cuales indican que la energía en los cuadrantes del lado derecho del huracán es más alta que en el lado izquierdo, debido a la asimetría del campo de vientos del huracán. El cuadrante frontal derecho (cuadrante II), presenta el oleaje más energético, alcanzado alturas de $H_s = 11$ metros de altura, mientras el cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV), con respecto a la dirección del huracán, presenta la menor magnitud de la energía, con olas de $H_s = 3$ metros de altura. La Tabla 5-1 presenta el valor máximo de energía por cuadrante y su respectivo porcentaje con respecto al valor máximo entre los cuadrantes, se hace la comparación del valor máximo obtenido con la simulación que tiene en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente.

Tabla 5-1.: Máximo valor de energía en el espectro direccional por cuadrante.

		Energía Cuadrante [$m^2/Hz/deg$]			
Fecha/Caso		I	II	III	IV
28/08/2005 00:00:00	SC	73 (32.5 %)	219 (100 %)	98 (43.5 %)	11 (4.7 %)
	C	64 (29.4 %)	226 (100 %)	118 (53.9 %)	8,8 (4.0 %)
28/08/2005 06:00:00	SC	109 (35.3 %)	309 (100 %)	161 (52.1 %)	8,7 (2.8 %)
	C	75 (22.7 %)	332 (100 %)	187 (56.3 %)	5,6 (1,7 %)
28/08/2005 12:00:00	SC	232 (60.1 %)	386 (100 %)	164 (42.5 %)	9,3 (2,4 %)
	C	175 (41.9 %)	418 (100 %)	158 (37.8 %)	8,4 (2,0 %)

De la tabla 5-1 en las 3 fechas analizadas (28/08/2005 00:00:00, 28/08/2005 06:00:00 y 28/08/2005 12:00:00), que corresponden a los instantes de tiempo, donde el huracán Katrina alcanza la máxima categoría, incrementando de la categoría 3 a la categoría 5, se observa para las simulaciones con y sin corrientes, que el cuadrante frontal derecho del huracán (cuadrante II) es el más energético, y considerando el valor de energía de en este cuadrante como referencia, se calcula el porcentaje que representa el valor máximo de energía de cada cuadrante. Se obtiene que el valor máximo de energía que se presenta en el cuadrante trasero derecho del huracán (cuadrante III) presenta aproximadamente el 50 % de la energía, el cuadrante frontal derecho (cuadrante I) el 30 % y el cuadrante trasero izquierdo (cuadrante IV) el 4 %. Además, se presenta un incremento de la energía máxima en los cuatro cuadrantes del huracán, a medida que le huracán incrementa de categoría. Los espectros direccionales en la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV) son dominados por ondas de mayor frecuencia, como se puede observar en los espectros escalares de frecuencia (5-2), a diferencia de los cuadrantes II y III, que distribuyen la energía en un rango de frecuencias más bajas. En el cuadrante frontal derecho la dirección del oleaje concuerda con la dirección de trasla-

ción del huracán (Moon et al., 2003; ?; Montoya et al., 2013), lo cual se observa en los espectros direccionales de energía (Figuras 5-23 - 5-25), donde la dirección del cuadrante II coincide con la dirección de traslación del huracán para los tres instantes de tiempo de estudio. Los cuadrantes de la parte izquierda del huracán (I y IV) presentan las mayores diferencias en la estimación del espectro escalar de frecuencias. Debido a la distribución espacial del campo de vientos del huracán, se observa que en cada cuadrante, la energía está distribuida en un rango diferente de direcciones (θ), y que la dirección pico (θ_p) asociada al máximo valor de energía varía. En las boyas que están ubicadas en el cuadrante frontal izquierdo y cuadrante trasero izquierdo (Cuadrantes I y IV) el comportamiento del espectro direccional de energía concentra los valores máximos de energía en dos direcciones diferentes, mientras que en los cuadrantes frontal derecho y cuadrante trasero derecho (cuadrantes II y III), la energía en el espectro direccional se concentra alrededor de una dirección pico (θ_p). En la boya ubicada en el cuadrante frontal izquierdo (cuadrante I), hay una componente de la energía en otra dirección, aunque de menor magnitud.

El espectro direccional en los cuadrantes I y IV distribuye la energía en diferentes picos, como se puede observar en los espectros de direcciones (Figuras 5-26 - 5-28), donde la energía está distribuida principalmente en dos direcciones, lo cual concuerda con Hu & Chen (2011), que informan que los espectros bimodales se presentan en el lado izquierdo del huracán (cuadrante I y IV) y definen cuatro tipos de espectros de huracanes bimodales donde: Tipo I el espectro está a una gran distancia ($R > 6R_{max}$) del centro de huracán; el tipo II tiene una gran diferencia entre las direcciones del viento y las olas; el Tipo III tiene componentes de oleaje de fondo (swell) y oleaje de viento (sea), y el tipo IV ocurre debido a los efectos costeros en aguas poco profundas. Los resultados del modelo actual indican que el huracán Katrina presenta espectros con una distribución de la energía, que son principalmente por los tipos II y III, lo cual concuerda con el análisis del huracán Sandy en el Golfo de México (Bennett & Mulligan, 2017).

En general, al tener en cuenta el efecto de las corrientes en la modelación, hay una distribución de la energía en frecuencias (f) y direcciones (θ). Al considerar la interacción ola-corriente en la modelación se presenta una disminución entre el 10 % y el 30 % del valor máximo de energía del espectro en los cuadrantes I y IV, y un incremento entre el 5 % y el 20 % del valor de máxima energía en los cuadrantes II y III (Tabla 5-1). El espectro de frecuencias $E(f)$, presenta un incremento de la energía en la parte derecha del huracán (cuadrantes II y III), lo que implica un incremento de la altura de ola significativa H_s , esto debido a que la corriente está generando un efecto de asomeramiento en la ola. En la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV) se observa que las corrientes disminuyen la magnitud de la energía, presentando un efecto contrario a los otros dos cuadrantes. Las diferencias que se presentan en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) al tener en cuenta el campo de corrientes están entre el 3 % y el 5 % en comparación con la simulación que no tiene en cuenta el campo de corrientes. En los cuadrantes I y IV, para los tres instantes de tiempos analizados, se presenta una disminución de la energía en el espectro de direcciones al tener en cuenta el campo de corrientes superficiales, mientras en los cuadrantes II y III hay un incremento. En el cuadrante IV se observa que hay una variación de los valores de la dirección pico (θ_p), mientras en los demás cuadrantes hay una variación de la magnitud de la energía.

Los cambios más significativos en la estimación de los espectros de energía se presentan en la parte izquierda del huracán (cuadrantes I y IV), los cuales corresponden a los cuadrantes menos energéticos. En general, se observa que en los diferentes instantes de tiempo de estudio, se presentan cambios de energía en los cuatro cuadrantes del huracán al tener en cuenta el efecto de la interacción ola corriente en la modelación espectral del oleaje.

5.4. Términos Fuente y sumidero

El término fuente total (S_{tot}) en el lado derecho de la ecuación de propagación de la onda (ver ecuaciones 3-9 y 3-10) se basa en todos los procesos físicos considerados en la modelación. El modelo de oleaje WWIII contiene parametrizaciones para diferentes procesos que pueden activarse individualmente (WW3DG, 2019). En aguas profundas, el término fuente neto S_{tot} generalmente se considera que consta de tres procesos físicos principales: un término de interacción atmósfera-oleaje S_{in} (entrada atmosférica), que generalmente es un aporte de energía positivo pero también puede ser negativo en el caso de presentar un sistema de oleaje tipo *swell*; un término de interacciones no lineales ola-ola S_{nl} y un término de interacción ola-océano que generalmente está dominado por el rompimiento de las olas S_{ds} (disipación de ondas) (Komen et al., 1996; Young, 1999; Tolman, 2014). En particular, en este trabajo se usaron las siguientes parametrizaciones de los términos fuente en el modelo, teniendo en cuenta el trabajo realizado por Montoya et al. (2013):

- Interacciones no lineal ola-ola (S_{nl}): Aproximación de interacción discreta (DIA) (Hasselmann et al., 1985)
- Interacción atmósfera-oleaje y oleaje-océano ($S_{in}+S_{ds}$): Paquete de términos fuente (ST2) de (Tolman & Chalikov, 1996)
- Interacción por fondo (S_{bot}): fórmula de fricción por fondo (BT1) propuesta por (Hasselmann et al., 1973)
- Entrada lineal agregada a S_{in} para garantizar un mejor inicio del modelo siguiendo la parametrización Cavaleri y Malanotte-Rizzoli con filtro (LN1). (Cavaleri & Rizzoli, 1981)

Las principales formulaciones empleadas en cada una de las parametrizaciones de los términos fuente se presentan en la sección 3.3 y las demás expresiones empleadas en los anexos A y B.

La primera interacción que se estudia es ola-corriente, cuyos resultados se presentan en la Figura 5-26 para los términos fuente y sumidero $S(f)$ en el punto que corresponde a la boya 42001 (ver Figura 5-9). El periodo de tiempo considerado comprende el rango desde 27/08/2005 06:00:00 hasta 29/08/2005 06:00:00, en intervalos de 6 horas durante el huracán Katrina. En esta figura, las líneas continuas corresponden a los resultados obtenidos con la simulación que no tiene en cuenta el efecto de las corrientes superficiales y las líneas punteadas corresponden a la simulación que si tiene en cuenta las corrientes. Se usa la siguiente convención de colores para los términos fuente y

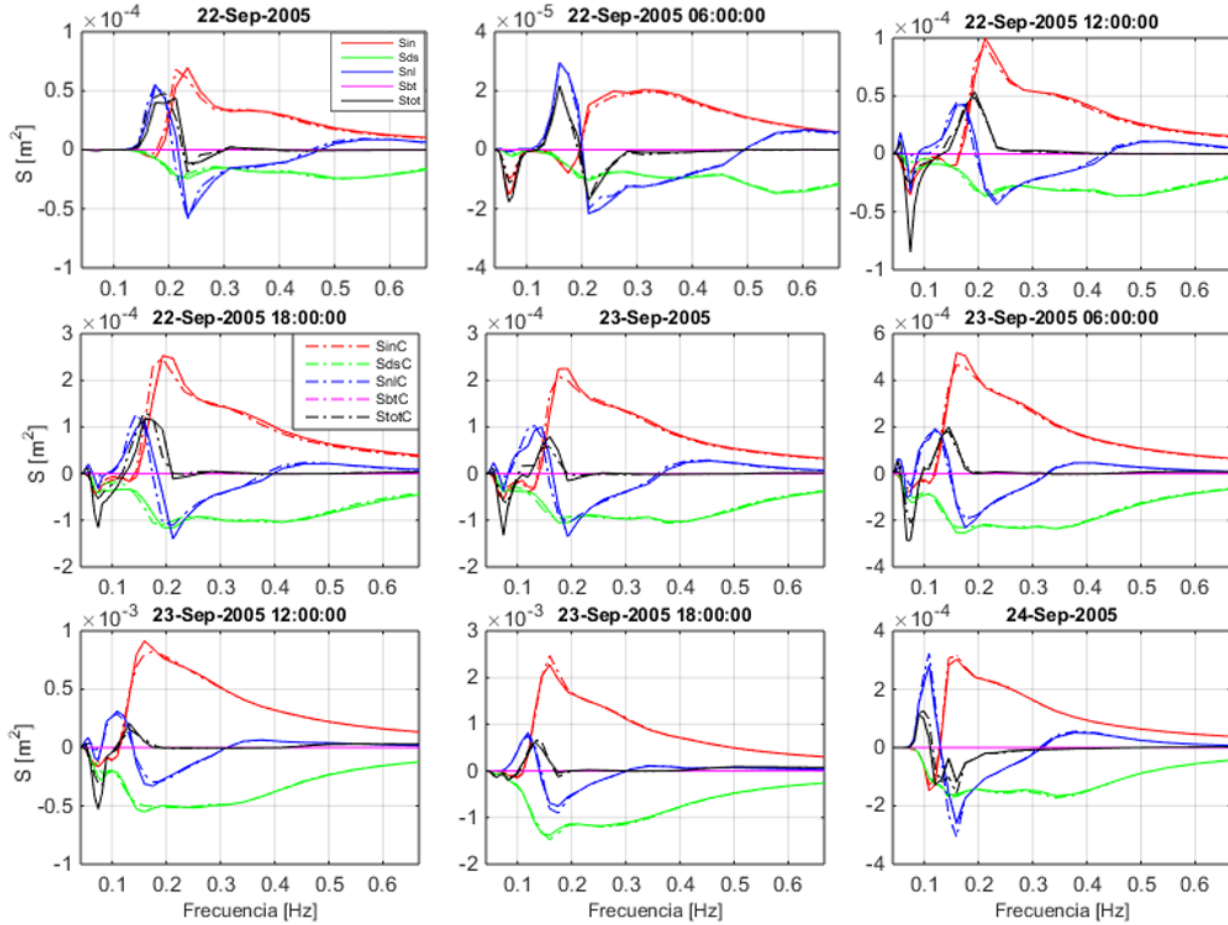


Figura 5-27.: Efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, que corresponde al paso del Huracán Rita en la ubicación que corresponde a la boya 42002 de la NOAA.

A partir de las Figuras 5-26 y 5-27, se observa que el término relacionado con la fricción por fondo (S_{bot} - Rosado), es cero en todo el rango de frecuencias, tanto para la boya 42001 en el caso del huracán Katrina, como para la boya 42002 en el caso del huracán Rita – ambas boyas ubicadas en aguas profundas. Esto se debe a que en aguas profundas, el término $\sinh(2kd)$ de la ecuación 3-36 tiende a infinito. Luego, la relación entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo es $n = 0,5$ y al reemplazar en la ecuación 3-35 se obtiene que el valor término sumidero que corresponde al efecto del fondo es igual a cero. Para los demás términos fuente/sumidero: interacciones no lineales (S_{nl} - línea azul), energía del viento (S_{in} - línea roja), rompimiento del oleaje (S_{ds} - línea verde), se presentan variaciones al incluir el campo de velocidad de corrientes superficiales (AVISO) en la modelación espectral del oleaje (líneas punteadas).

El término fuente/sumidero asociado a la interacción de la atmósfera con el oleaje (S_{in}) presenta valores negativos en el rango de frecuencias más bajas ($0,042H_z$ - $0,15H_z$), durante el paso de los huracanes Katrina y Rita. El efecto de la atmósfera, representada en el valor de la energía por el viento (también representada por S_{in}) disminuye en los instantes en que la energía se concentra

en las bajas frecuencias ($f < 0,15 \text{ Hz}$) en el espectro de frecuencias, formando un sistema del oleaje tipo swell (ver figuras 5-2 y 5-5). Este rango de frecuencias está relacionado con las olas más grandes (periodos grandes), luego la disminución de la energía del oleaje debido a la interacción con el viento puede estar relacionada con el límite de crecimiento de la ola, generando rompimiento. En el caso del huracán Katrina, la disminución de la energía en las bajas frecuencias se observa en los instantes de tiempo entre 27/08/2005 12:00:00 y 28/08/2005 12:00:00, en los cuales la boya 42001 se encuentra en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II), a distancias que varían entre 577 y 220 kilómetros. En estos valores de tiempo, el huracán incrementa desde la categoría 3 hasta la categoría 5, incrementando la energía de los términos fuente en dos órdenes de magnitud (10^{-5} hasta 10^{-3}). El efecto de la interacción ola-corriente produce un incremento de la energía en las bajas frecuencias ($f < 0,15 \text{ Hz}$), y una disminución de la energía en el resto de frecuencias ($0,15\text{-}0,65 \text{ Hz}$). El valor de la frecuencia en la que se presenta el cambio de signo de la energía, varía a medida que el huracán incrementa de categoría y reduce la distancia respecto a la boya, acercándose a la magnitud de frecuencia de $0,15 \text{ Hz}$. La fecha 28/08/2005 18:00:00, corresponde al instante en el cual el huracán alcanza la máxima categoría (5) y se encuentra más cerca de la boya (127 kilómetros), presentando los máximos valores de energía y un sistema de oleaje tipo *swell* muy energético. A partir de este instante, la categoría del huracán empieza a descender (ver 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 06:00:00), y se empieza a distanciar de la boya, la cual se ubica en la parte trasera izquierda de éste (Cuadrante IV). En este cuadrante, la energía se redistribuye hacia un rango de frecuencias más altas (ver figura 5-2), alcanzando nuevamente la categoría 4. En estos instantes, las simulaciones con y sin corrientes presentan valores positivos en las bajas frecuencias, y la interacción ola-corriente produce un incremento de la energía en las altas frecuencias ($0,15\text{-}0,65 \text{ Hz}$).

En el caso del huracán Rita, se observa un comportamiento similar al huracán Katrina. Se presenta una pérdida de energía debido a la interacción del viento con el oleaje en las bajas frecuencias, cuando se presentan un sistema de oleaje tipo *swell* (ver Figuras 5-6 y 5-27), y en los casos que la energía se distribuye en un rango mayor de frecuencias, la energía en las bajas frecuencias incrementa. En el periodo de tiempo entre 22/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 12:00:00 la boya 42002 está ubicada en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante I), disminuyendo de categoría 5 a categoría 4. En estos instantes, la interacción ola-corriente incrementa la energía en las bajas frecuencias y disminuye la energía en el resto de frecuencias. A partir de este instante (ver 23/09/2005 18:00:00 y 24/09/2005 00:00:00), el huracán desciende de categoría y se empieza a distanciar de la boya, la cuál se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (Cuadrante IV). Allí, la energía se redistribuye en un rango de frecuencias más altas y la interacción ola-corriente produce un incremento de la energía asociada al valor pico de energía. Los valores máximos de energía por el efecto del viento se presentan en el rango de frecuencias $0,15 \text{ Hz}$ - $0,25 \text{ Hz}$ y dependen de la categoría del huracán, la ubicación de la boya con respecto a la dirección de traslación y el ojo de la tormenta.

El efecto de la interacción ola - corriente, presenta diferencias porcentuales en la estimación de la energía pico de la interacción del oleaje con el viento (S_{in}) que oscilan entre -15% y 15% , en el caso del huracán Katrina, y diferencias que oscilan entre -12% y 5% , en el caso del huracán Rita, para los instantes de tiempo analizados.

El término correspondiente a las interacciones del oleaje con el océano S_{ds} presenta valores negativos en todo el rango de frecuencias (0,042-0,65 Hz) para las simulaciones con y sin corrientes. Este efecto se produce durante el paso de ambos huracanes y corresponde a la disipación de la energía por la rotura de las olas (whitecapping). En el caso del huracán Katrina, en los tres primeros instantes de tiempo (ver 27/08/2005 06:00:00 hasta 27/08/2005 18:00:00) los valores máximos de disipación de energía se concentran en frecuencias mayores a 0,5 Hz . A medida que el huracán avanza (ver 28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00) e incrementa de categoría, la boya se ubica en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I) presentando los máximos valores de disipación entre 0,3 y 0,4 Hz . A partir de este instante (ver 23/09/2005 18:00:00 y 24/09/2005 00:00:00), el huracán desciende de categoría y se empieza a distanciar de la boya, la cuál se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV), donde se observa que los valores máximos de disipación se concentran en el rango de frecuencias 0,1 - 0,2 Hz . Al incluir el campo de corrientes en la modelación espectral, disminuye la disipación de energía en los instantes que la boya se encuentra en la parte frontal del huracán (cuadrantes I y II). A medida que el huracán avanza y la boya se ubica en el parte frontal izquierda (cuadrante IV), se presenta un incremento en la disipación de la energía al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente, siendo más significativa la diferencia cerca al valor pico de disipación de energía.

En las figuras **5-26** y **5-27**, se observa una relación entre los términos que corresponden a la energía por el viento (S_{in}) y la disipación de energía S_{ds} , al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales de AVISO. Para el caso del huracán Katrina, en los instantes que el valor máximo de energía por el viento disminuye, hay una disminución del valor máximo de disipación (cuadrante I y II - ver Figura **5-2**), y en el caso contrario, en los instantes de tiempo que la energía por el viento incrementa, hay mayor disipación de la energía (cuadrante IV). En el caso del huracán Rita, se observa un efecto similar al huracán Katrina, siendo menor el efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento del término asociado a la disipación. En las simulaciones con y sin corrientes, a medida que el huracán se acerca a la ubicación de la boya, el valor máximo de disipación se desplaza de las altas a las bajas frecuencias. El efecto de la interacción ola - corriente presenta diferencias porcentuales en la estimación de la energía pico de la interacción no lineal (S_{ds}) que oscilan entre -12% y 30% para el caso del huracán Katrina, y diferencias que oscilan entre -9% y 2% en el caso del huracán Rita.

Considerando ahora el término asociado a las interacciones no lineales ola-ola (S_{nl}), cuando la boya 42001 se encuentra en la parte frontal del huracán Katrina (cuadrantes I y II - ver Figura **5-2**), entre las fechas 27/08/2005 06:00:00 y 28/08/2005 12:00:00, el efecto de la interacción ola-corriente disminuye el valor de la energía máxima (picos positivos), y disminuye la disipación de energía (picos negativos). Los valores máximos de energía (pico positivo) se concentra en la bajas frecuencias (0,1 Hz - 0,2 Hz), concentrándose en los primeros instantes cerca a la frecuencia 0,2 Hz . A medida que el huracán incrementa de categoría, alcanzando la máxima categoría en 28/08/2005 12:00:00, el valor pico se concentra alrededor de la frecuencia 0,1 Hz . En este mismo periodo, se observa que la máxima disipación de energía (pico negativo) se concentra en el rango de frecuencias 0,15 Hz - 0,25 Hz , concentrándose en los primeros instantes, cerca a la frecuencia 0,25 Hz , y luego

desplazándose a la frecuencia 0,15 Hz . A partir de 28/08/2005 12:00:00, la categoría del huracán empieza a descender de categoría (ver 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 06:00:00) y se empieza a distanciar de la boya 42001, la cual se ubica en la parte trasera izquierda de éste (cuadrante IV). En estos instantes, el efecto de las corrientes incrementa el valor máximo de disipación (pico negativo) y valor máximo de energía (pico positivo).

En el caso del huracán Rita y considerando el término asociado a las interacciones no lineales ola-ola (S_{nl}), se observa un comportamiento similar al huracán Katrina. Sin embargo, se presentan menores diferencia al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales. En el periodo de tiempo comprendido entre 22/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 12:00:00, la boya 42002 está ubicada en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante I), disminuyendo de categoría 5 a categoría 4. En estos instantes, la interacción ola-corriente disminuye la disipación de energía que resulta de considerar la interacción ola-ola (S_{nl}). Luego, entre 23/09/2005 18:00:00 y 24/09/2005 00:00:00, el huracán desciende de categoría y se empieza a distanciar de la boya, la cuál se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV) donde la energía se redistribuye en un rango de frecuencias más altas. En este intervalo de tiempo, la interacción ola-corriente produce un incremento de la energía asociada al valor pico de energía (pico positivo) y un incremento de la disipación de energía (pico negativo).

El efecto de la interacción ola - corriente presenta diferencias porcentuales en la estimación de la energía pico de las interacciones no lineales (S_{nl}) que oscilan entre -20% y 30% , en el caso del huracán Katrina, y diferencias que oscilan entre -12% y 5% , en el caso del huracán Rita. Durante el paso de los huracanes Katrina y Rita se presenta una relación entre los términos que corresponden a la energía por el viento (S_{in}) y la disipación de la energía por interacciones no lineales (S_{nl}). En el rango de frecuencias en que la energía por el viento incrementa (0,15 Hz - 0,25 Hz), la energía por las interacciones no lineales (S_{nl}) disminuye. Al considerar el efecto de las corrientes en la simulación, se observa que en los instantes de tiempo que las corrientes disminuyen la energía máxima de entrada por viento, disminuye también la disipación de la energía. En el caso contrario, donde el efecto de las corrientes incrementa la energía por la interacción del oleaje con el viento, hay un incremento en la energía disipada. En general se observa que la frecuencia asociada al valor pico de disipación de energía debido a las interacciones no lineales (S_{nl}) coincide con la frecuencia en la cual se presenta el valor máximo de energía debido a la interacción del viento con el oleaje.

Finalmente, analizando la energía total (S_{tot}), se observa que para el caso del huracán Katrina en el primer instante de tiempo analizado (27/08/2005 06:00:00), la S_{tot} presenta valores positivos en todo el rango de frecuencias (0,042-0,65 Hz). Además, la máxima energía se concentra alrededor de una frecuencia 0,18 Hz . En este instante el efecto de la corriente produce una disminución de un 15% en el valor pico de la energía (S_{tot}). A medida que el huracán incrementa de categoría 3 a 5, (ver 27/08/2005 12:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00) se acerca a la boya 42001, la cual se ubica en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I) generando un sistema de oleaje tipo *swell*. En este rango de tiempo, se presentan valores positivos y negativos en las bajas frecuencias (0,042-0,2 Hz). El efecto de la interacción ola-corriente afecta la magnitud de los valores pico de energía,

presentando diferencias porcentuales que van hasta 20 %. Además, durante este periodo, se observa que el efecto de las corrientes superficiales incrementa la energía en todo el rango de frecuencias, incrementando el valor de energía máxima (picos positivos) y disminuyendo la disipación de energía (picos negativos). Luego, la categoría del huracán empieza a descender (ver 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 06:00:00), y se empieza a distanciar de la boya, la cual se ubica en la parte trasera izquierda de éste (cuadrante IV). Se observa que la energía total (S_{tot}) es positiva en todo el rango de frecuencias, y al considerar el efecto de la interacción ola-corriente, hay un incremento de los valores pico, con diferencias porcentuales que alcanzan un 40 %.

En el caso del huracán Rita, se observa que la energía total (S_{tot}) tiene un comportamiento similar al huracán Katrina. Se presenta una pérdida de la energía total en las bajas frecuencias, cuando se presenta un sistema de oleaje tipo *swell* (ver Figuras 5-6 y 5-27). En los casos en que la energía se distribuye en un rango mayor de frecuencias, la energía en las bajas frecuencias incrementa. En el periodo comprendido entre 22/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 12:00:00 el huracán se acerca a la boya 42002, la cual se ubica en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante I), disminuyendo de categoría 5 a categoría 4. En estos instantes de tiempo la interacción ola-corriente incrementa el valor de energía máxima (picos positivos) y disminuye la disipación de energía (picos negativos). A partir de este instante (ver 23/09/2005 18:00:00 y 24/09/2005 00:00:00), el huracán desciende de categoría y se empieza a distanciar de la boya, la cuál se ubica en la parte trasera izquierda del huracán (cuadrante IV). En estos intervalos de tiempo, incrementa la energía en las bajas frecuencias y el efecto de la interacción ola-corriente incrementa la magnitud del pico de energía y disminuye la disipación.

En general, se observa que en los instantes que se presenta un sistema de oleaje tipo *swell*, hay una disminución de la energía total de los términos fuente en las bajas frecuencias y el efecto de las corrientes modifica la magnitud de los valores picos positivos y negativos. Los valores máximos de energía se presentan en el rango de frecuencias 0,1 Hz - 0,2 Hz . Se observa que en las frecuencias más altas (0,3-0,66 Hz) hay una compensación entre el incremento de la energía debido a la interacción ola-ola y energía por viento y la disminución de energía debido a la disipación por las interacciones oleaje-océano, lo cual concuerda con lo encontrado por Tamura et al. (2010).

Para analizar las variaciones que se presentan en la estimación de los términos fuente y sumidero (S_{in} , S_{ds} , S_{nl} y S_{tot}) al incluir el efecto de las interacción ola-corriente en la simulación, se calcula el error porcentual entre las simulaciones con y sin corrientes a partir de la siguiente expresión:

$$Error\ porcentual = 100 \times \frac{S(f)_{corrientes} - S(f)_{Sin\ corrientes}}{S(f)_{Sin\ corrientes}}. \quad (5-6)$$

Usando esta ecuación, se calculan las diferencias porcentuales de los términos fuente y sumidero del oleaje, las cuales se presentan en la Figura 5-28. Los datos corresponden a las fechas que van desde 27/08/2005 18:00:00 hasta 29/08/2005 18:00:00, en intervalos de 6 horas durante el paso del huracán Katrina.

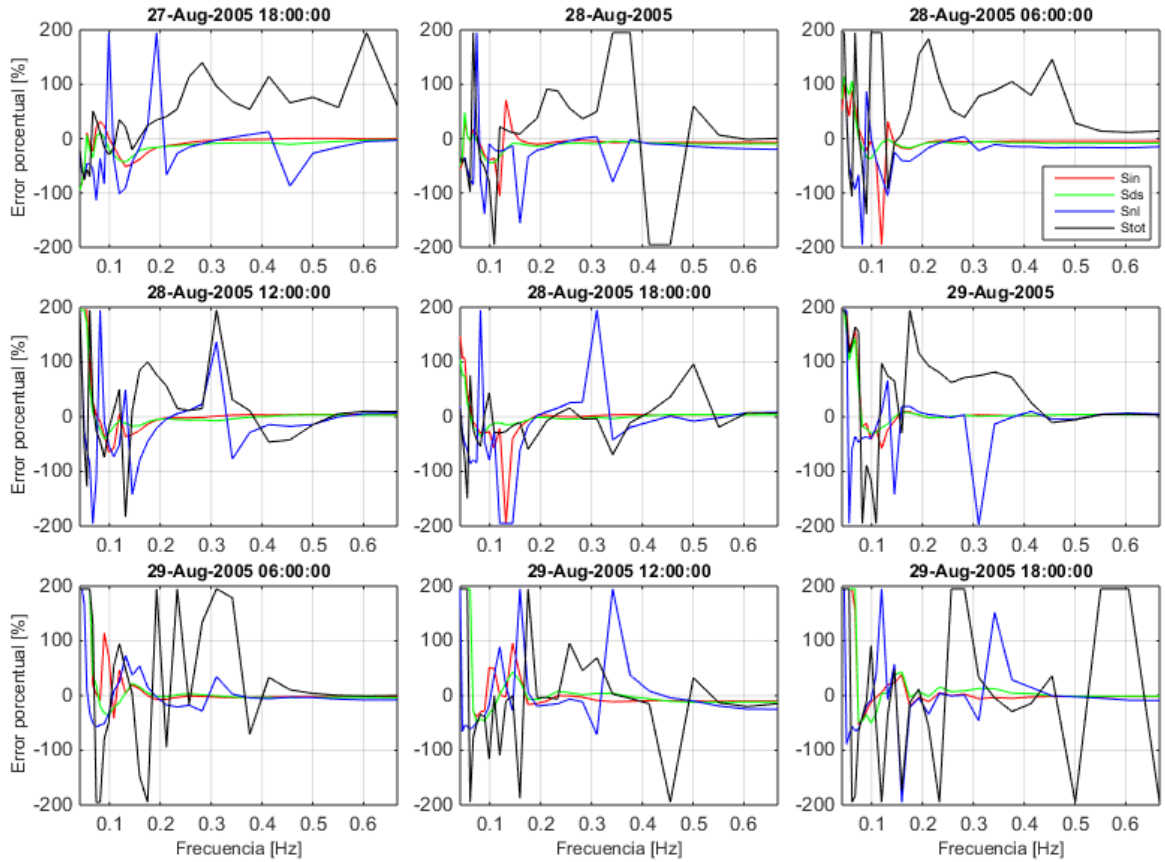


Figura 5-28.: Error porcentual del efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 27/08/2005 18:00:00 hasta 29/08/2005 18:00:00, corresponde al paso del Huracán Katrina, en la ubicación que corresponde a la boya 42001 de la NOAA.

En la Figura 5-28, se observa que el efecto del campo de corrientes superficiales de AVISO, en los términos que corresponden a la interacción entre la atmósfera y el oleaje (S_{in}) y el oleaje con el océano (S_{ds}), presentan las mayores diferencias porcentuales en las bajas frecuencias ($0,042\text{ Hz}$ - $0,22\text{ Hz}$) con valores que oscilan entre -100% y 100% , con valores pico que van hasta aproximadamente 200% . En el rango de frecuencias $0,22\text{ Hz}$ - $0,66\text{ Hz}$, se presentan diferencias máximo de 15% , al tener en cuenta las corrientes de AVISO. El término que corresponde a la interacción no lineal (S_{nl}), presenta diferencias porcentuales con una mayor oscilación en las frecuencias más bajas ($0,042\text{ Hz}$ - $0,22\text{ Hz}$), y diferencias de hasta 30% en el resto de frecuencias, con valores picos que van hasta 190% . Las diferencias que se presentan en la energía total (S_{tot}) varían entre -60% y 60% , alcanzando diferencias en algunas frecuencias de hasta 200% . En general, se obtiene que el efecto de la interacción ola-corriente, presenta una mayor variación de la magnitud de la energía de los términos fuente y sumidero en el rango de frecuencias más bajas, mientras que en las frecuencias más altas el efecto es menor.

La Figura 5-29 presenta las diferencias porcentuales de los términos fuente y sumidero del oleaje usando la ecuación 5-6 para los datos correspondientes al huracán Rita en las fechas comprendidas entre 22/09/2005 00:00:00 y 24/08/2005 00:00:00, en intervalos de 6 horas.

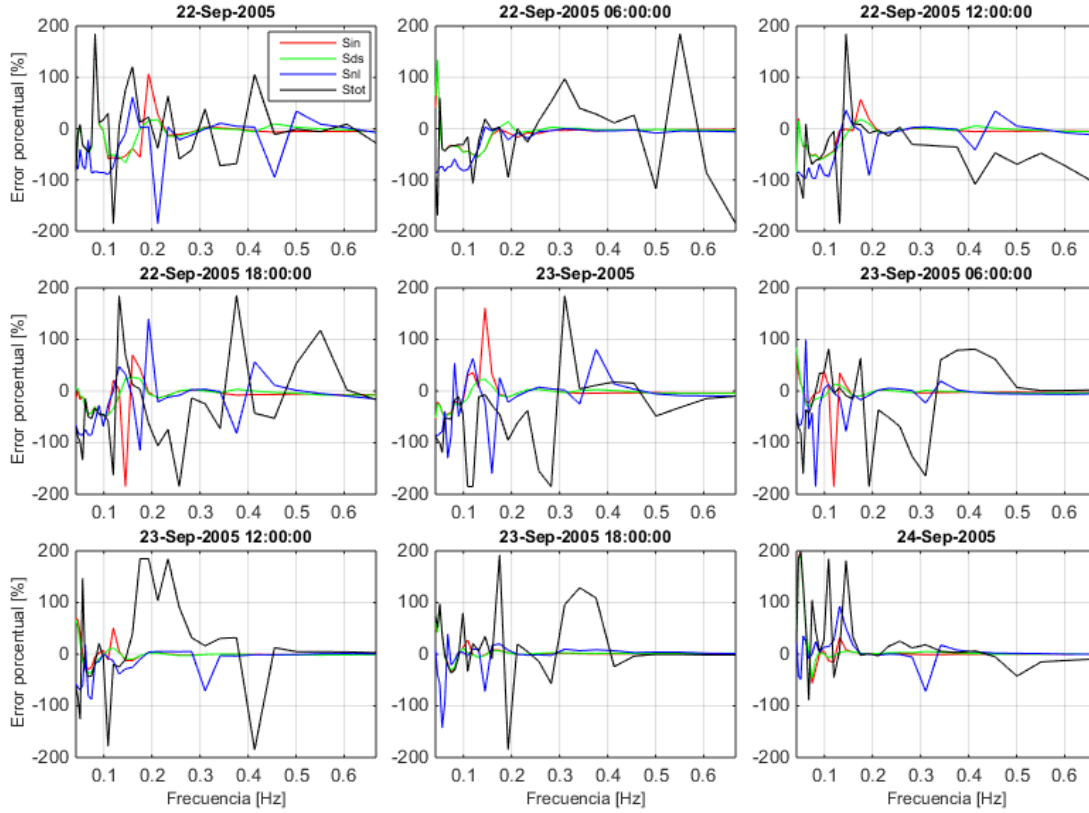


Figura 5-29.: Error porcentual del efecto de la interacción ola-corriente en el comportamiento de los términos fuente y sumidero del oleaje. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 22/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, corresponde al paso del Huracán Rita, en la ubicación que corresponde a la boya 42002 de la NOAA.

Similarmente, en el caso del huracán Rita, el efecto de las corrientes generan diferencias porcentuales en los términos que corresponden a la interacción entre el viento y el oleaje (S_{in}) y la disipación (S_{ds}), con valores que oscilan entre -70% y 70% en las frecuencias más bajas ($0,042 H_z$ - $0,20 H_z$), con valores pico que van hasta aproximadamente 180% . En el rango de frecuencias $0,20 H_z$ - $0,66 H_z$, se presentan diferencias máximo de 15% , al tener en cuenta las corrientes de AVISO. El término S_{nl} , presenta diferencias porcentuales con una mayor oscilación en las frecuencias más bajas ($0,042 H_z$ - $0,20 H_z$), y diferencias de hasta 20% en el resto de las frecuencias, con valores picos que van hasta 190% . Las diferencias porcentuales en la energía total oscilan entre -70% y 70% en todo el rango de frecuencias, alcanzando diferencias en algunas frecuencias de hasta 180% .

A continuación, se analiza cualitativamente la variación de la dirección del oleaje al tener en cuenta el efecto de las corrientes, y la relación con los cambios en los términos fuente/Sumidero. La Figura 5-30 presenta los resultados de este análisis para las fechas entre 28/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 12:00:00, en intervalos de 12 horas durante el paso del huracán Katrina. Los resultados corresponden a la ubicación de la boya 42001.

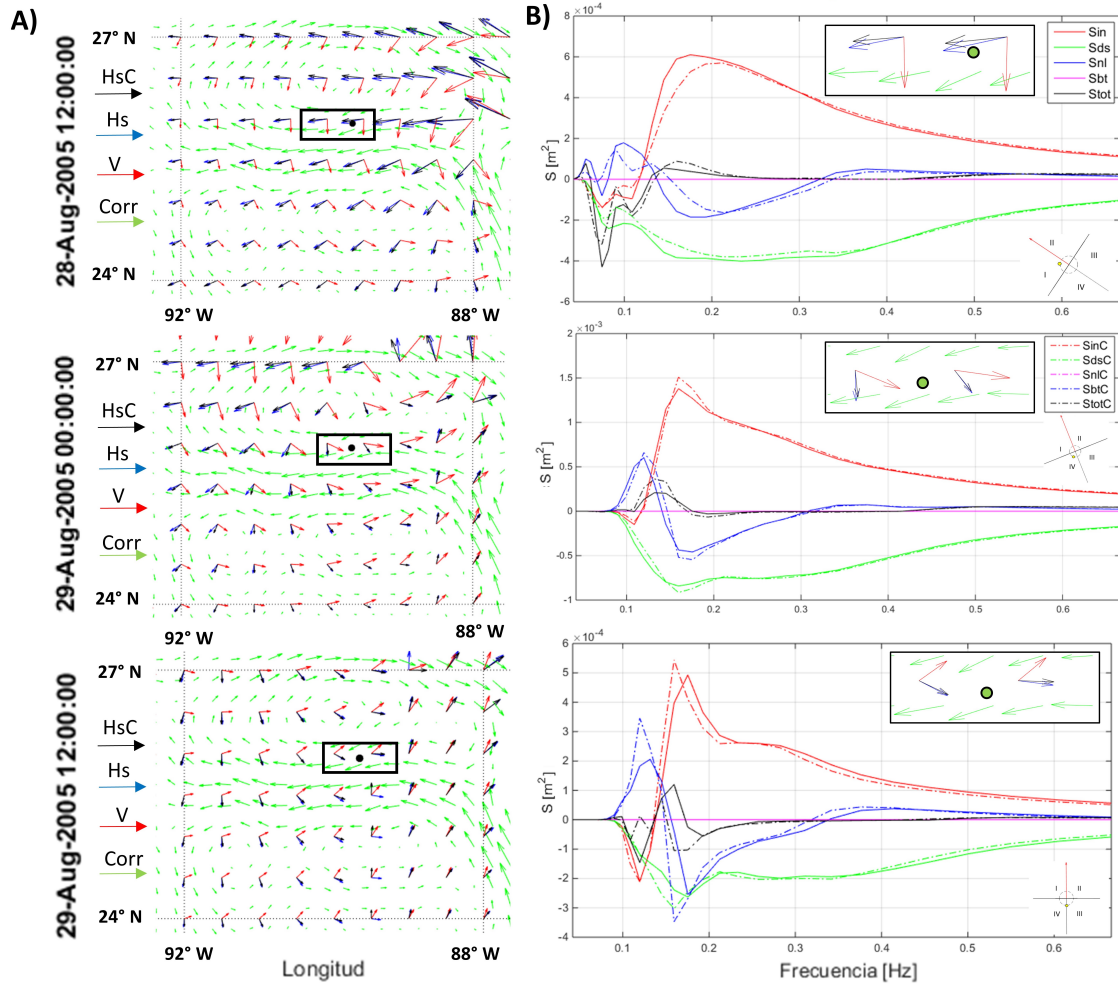


Figura 5-30.: Análisis cualitativo de la variación de la dirección del oleaje al tener en cuenta el efecto de las corrientes, y la relación con los cambios en los términos fuente/Sumidero. (A) Superposición del campo de corrientes (flecha verde), dirección del viento (flecha roja) y dirección del oleaje (flecha negra y azul), además se presentan la ubicación de la boya 42001 (punto negro). (B) Términos fuente y sumidero, con y sin corrientes. Los resultados presentados corresponden a las fechas 28/08/2005 12:00:00 hasta 29/08/2005 12:00:00, cada 12 horas, durante el paso del huracán Katrina.

De igual manera, para el huracán Rita, se analiza cualitativamente la variación de la dirección del oleaje al tener en cuenta el efecto de las corrientes, y la relación con los cambios en los términos fuente/Sumidero. La Figura 5-31 presenta los resultados para las fechas entre 23/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, en intervalos de 12 horas. Los resultados corresponden a la ubicación de la boya 42002.

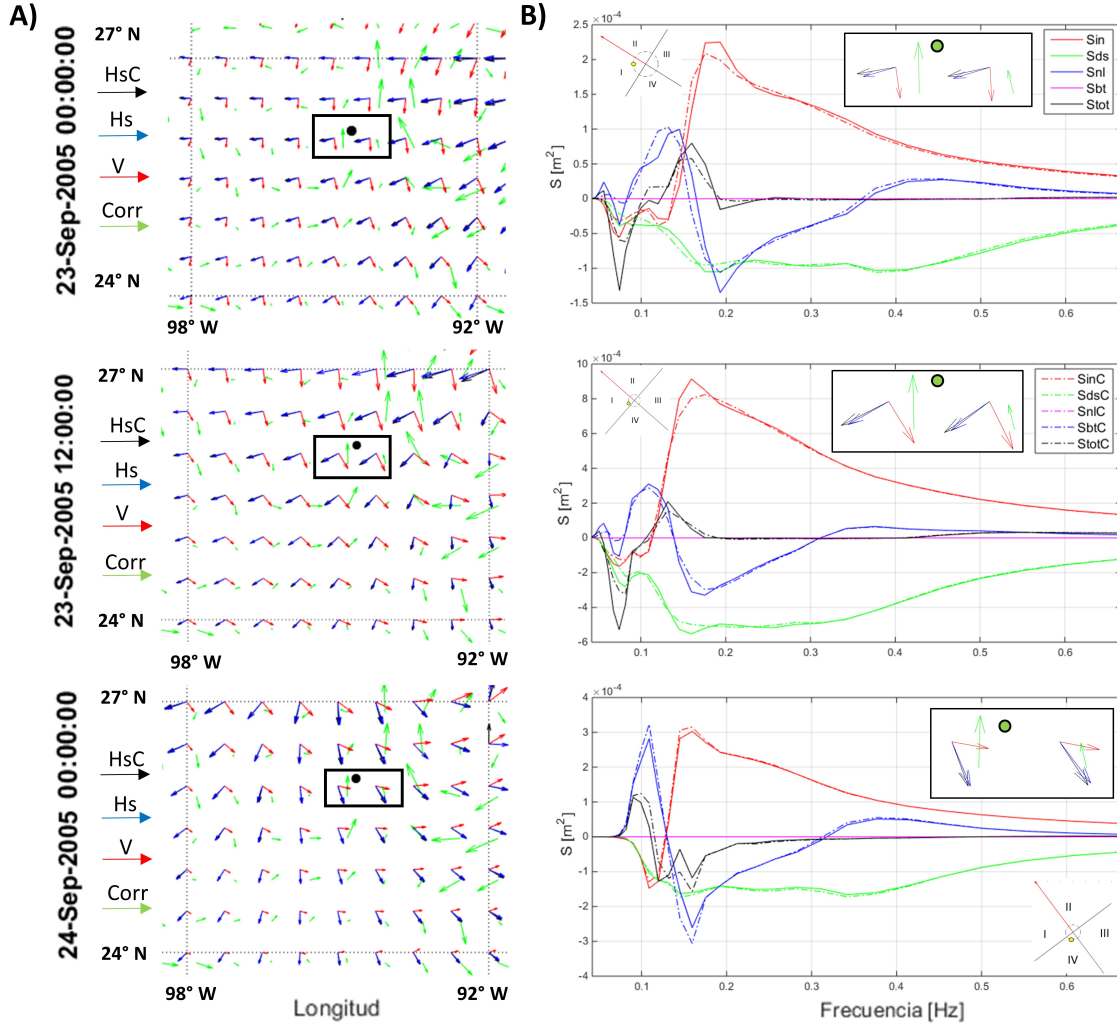


Figura 5-31.: Análisis cualitativo de la variación de la dirección del oleaje al tener en cuenta el efecto de las corrientes, y la relación con los cambios en los términos fuente/Sumidero. (A) Superposición del campo de corrientes (flecha verde), dirección del viento (flecha roja) y dirección del oleaje (flecha negra y azul), además se presentan la ubicación de la boya 42002 (punto negro). (B) Términos fuente y sumidero, con y sin corrientes. Los resultados presentados corresponden a las fechas 23/09/2005 00:00:00 hasta 24/09/2005 00:00:00, cada 12 horas, durante el paso del huracán Rita.

En las figuras 5-30 y 5-31, las variaciones que se presentan en el término fuente/sumidero, correspondientes a la energía transferida desde la atmósfera hacia el oleaje (S_{in}), están relacionadas con el cambio de la dirección del oleaje (θ) producto de la interacción con el campo de corrientes superficiales. En el recuadro de la parte superior derecha de las gráficas de frecuencia se observa que existe una diferencia entre la dirección del oleaje que tiene en cuenta las corrientes (flecha negra) y los resultados que no las tiene en cuenta (flecha azul). Este efecto se entiende a partir de estudiar las ecuaciones 3-18 y 3-13 en la sección 3.3. En la ecuación 3-18, la energía debido a la interacción viento-ola (S_{in}) es directamente proporcional al parámetro adimensional β (ver ecuación 3-19), el cual depende de la frecuencia relativa no dimensional (σ_a), el coeficiente de arrastre C_λ y la velocidad del viento (u_λ) a una altura igual a la longitud de onda aparente (λ_a). En la formulación propuesta por Tolman & Chalikov (1996) el valor de σ_a , y λ_a dependen de la dirección

relativa entre la dirección del oleaje y la dirección del viento ($\theta - \theta_w$) (Ecuaciones 3-20 hasta 3-23). Además, en la ecuación 3-13, la variación del campo de corrientes a lo largo de la dirección m , que corresponde a la normal de la dirección de propagación (a lo largo de la cresta de la ola), produce un cambio en la variación temporal de la dirección (θ) (Holthuijsen, 2010; WW3DG, 2019). Por lo tanto, al tener en cuenta el campo de corrientes del oleaje hay una variación de la dirección relativa ($\theta - \theta_w$), lo que implica un cambio en la magnitud de los parámetros σ_a y λ_a .

$$\sigma_a = \frac{\sigma u_\lambda}{g} \cos(\theta - \theta_w) \quad (5-7)$$

$$\lambda_a = \frac{2\pi}{k |\cos(\theta - \theta_w)|} \quad (5-8)$$

Estas dos ecuaciones, a su vez, cambian la magnitud del parámetro no dimensional β (ver ecuación 3-19) y modifica el valor de la energía atmósfera-oleaje (S_{in}). Un incremento de la magnitud de la frecuencia relativa (σ_a) implica un incremento del parámetro β , obteniéndose así un mayor S_{in} . En el caso del huracán Katrina, se observa que en el primer instante, 28/08/2005 12:00:00, cuando la boya está ubicado en la parte frontal izquierda (cuadrante I), el efecto de las corrientes superficiales genera una disminución de la energía pico de S_{in} . En este instante, el efecto de las corrientes incrementa el ángulo entre la dirección del viento (θ_w) y la dirección del oleaje (θ). Luego, al pasar la boya a la parte trasera izquierda (cuadrante IV) en los instantes 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 12:00:00, el efecto de las corrientes disminuye el ángulo entre la dirección del oleaje y el viento. La ecuación 5-7 indica que al disminuir el ángulo entre la dirección del oleaje (θ_w) y el viento (θ), hay un incremento de la frecuencia relativa no dimensional (σ_a), lo que incrementa la energía que ingresa al oleaje procedente el viento (S_{in}). Durante el paso del huracán Rita se observa un comportamiento similar. Para los instantes 23/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 12:00:00, el ángulo entre la dirección del oleaje y la dirección de las corrientes incrementa. En estos intervalos de tiempo se presenta una disminución del valor máximo de la energía por viento (S_{in}). En el instante 24/09/2005 00:00:00, las corrientes y el oleaje presentan aproximadamente la misma dirección; observándose un incremento del valor máximo de energía, sin embargo las diferencias no son significativas. Por otro lado, también se debe considerar que las variaciones en la dirección del oleaje afectan además la longitud de onda aparente (λ_a) (ver ecuación 5-8). A partir de λ_a se calcula la velocidad del viento (u_λ), la cual, como se observa en la ecuación 5-7, también modifica la frecuencia relativa no dimensional (σ_a).

Ahora, se analiza el efecto de las corrientes en el término sumidero correspondiente a la interacción del oleaje con el océano (S_{ds}). En el caso del huracán Katrina, se presenta una disminución en la disipación de la energía en la primera fecha (28/09/2005 12:00:00), cuando la boya está ubicada en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I). Luego, al pasar la boya a la parte trasera izquierda (cuadrante IV) en los instantes 29/08/2005 00:00:00 y 29/08/2005 12:00:00, se observa un incremento del valor pico de disipación. En la Figura 5-2 se presentó el comportamiento del espectro escalar de frecuencias al tener en cuenta el efecto de las corrientes superficiales, donde se observa una disminución de la energía en los instantes 28/08/2005 12:00:00 y 29/08/2005 00:00:00, y un incremento de energía en el instante 29/08/2005 12:00:00. Similarmente, en el caso del huracán

Rita, para los instantes 23/09/2005 00:00:00 y 23/09/2005 12:00:00, cuando la boya está ubicada en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I) se presenta una disminución del valor pico de disipación. En el instante 24/09/2005 00:00:00 no se presentan cambios significativos ($< 2\%$) en la disipación de la energía. En la Figura 5-5 se observa que en los dos primeros instantes hay una disminución de la energía en el espectro escalar de frecuencias, y en el siguiente instante, presentan un comportamiento similar. Para entender mejor esta disipación de la energía, se analiza el espectro N y la escala h en la ecuación 3-26 (ver también Anexo B, ecuación B-19). Un incremento de la energía en el espectro direccional N , también produce un incremento de la escala de mezcla h , y los cuales son directamente proporcionales a la disipación de la energía por la interacción del oleaje con el océano (S_{ds}).

El efecto de la interacción ola-corriente también produce variaciones en el término fuente/sumidero que corresponde a las interacciones no lineales ola-ola (S_{nl}). En este caso, se presentan los mayores cambios en las bajas frecuencias y una transición de valores positivos a negativos alrededor de la frecuencia pico, transición que se correlaciona con el valor máximo del término neto S_{tot} . El término debido a las interacciones no lineales se determina usando la ecuación 3-16 propuesta por Hasselmann et al. (1973), que usa los parámetros propuesto por Tolman & Chalikov (1996). En esta expresión el término de interacción no lineal depende del valor de energía asociado a cada pareja de frecuencias y direcciones (f, θ). Al incluir el efecto de las corrientes hay una redistribución de la energía en frecuencias (f) y direcciones (θ), lo que genera variaciones en el comportamiento del término fuente/sumidero (Figura 5-2 y 5-5). En los intervalos donde hay un incremento de energía al incluir el efecto de la interacción ola-corriente se observa que los valores picos asociados a la interacción no lineal disminuyen la magnitud. A medida que la energía va aumentando, y comparando con el espectro sin el campo de corrientes, se observa que los valores picos incrementan en magnitud. En los instantes de tiempo donde el espectro de energía coincide en ambas simulaciones (con y sin corrientes) se observa que no hay una variación significativa en la estimación del término fuente/sumidero asociado a la interacción no lineal.

En general, se observa que la magnitud y la variabilidad de los términos fuente y sumidero calculados con el modelo de oleaje WWIII con y sin corrientes, concuerda con los valores presentados en trabajos previos (Ortiz-Royero & Mercado-Irizarry, 2008; Tamura et al., 2010; Zieger et al., 2015). El efecto de la interacción ola corriente en la simulación presenta mayores diferencias de los términos fuente y sumidero en las bajas frecuencias ($f < 0,2 \text{ Hz}$). El caso opuesto se da en las altas frecuencias, donde se presenta un equilibrio entre el aumento de energía debido a las interacciones no lineales y atmósfera-oleaje, y la disipación de energía debido a la interacción del oleaje-océano. Al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente hay una modificación de los términos fuente y sumidero con respecto a la dirección de traslación del huracán y la ubicación del centro de la tormenta, lo cual determina el comportamiento del espectro, y de la dirección relativa entre oleaje y el campo de corrientes.

6. Metodología para la modelación numérica de la interacción ola-corriente teniendo en cuenta el perfil de corrientes

En los capítulos 4 y 5, se observó que al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje durante condiciones extremas de viento de huracán, se presentan diferencias porcentuales significativas en la estimación de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p), y una redistribución de la energía en el espectro de frecuencias ($E(f)$) y en el espectro direccional de energía ($E(f, \theta)$), y en los términos fuente/sumidero ($S(f)$). En esta investigación se propone una nueva metodología que permite tener en cuenta los perfiles del campo de velocidad de corrientes en la modelación espectral del oleaje. Para tener en cuenta el efecto del perfil de corrientes en el modelo de oleaje WAVEWATCH III[®] (WWIII) (Tolman, 2002a, 2009, 2014; WW3DG, 2016, 2019) se estima un valor ponderado, teniendo en cuenta la magnitud y la dirección de las corrientes en las diferentes profundidades disponibles de los datos de reanálisis de GLORYS, los cuales tienen una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 28 kilómetros, con 71 niveles en profundidad (0,5 - 5000 metros). Con los resultados obtenidos a partir de la modelación espectral se analiza el efecto del campo de corrientes ponderado, en la estimación de los parámetros escalares y los espectros de energía del oleaje, en comparación con las mediciones de las boyas de la NOAA, ubicadas en el Golfo de México.

6.1. Descripción de la metodología

Ecuación de ponderación

Al tener en cuenta el efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral, se ven modificados los términos de la ecuación de propagación del oleaje. El espectro del oleaje se determina analizando la variación del flujo de energía en el espacio (longitud, latitud), y la variación en el espacio espectral de frecuencias y direcciones (f y θ). El flujo de energía se determina como el producto de la velocidad de propagación y el espectro de densidad de onda. Al considerar el efecto de las corrientes en la modelación espectral, las velocidades de propagación del espectro en el espacio geográfico (C_x, C_y) y en el espacio espectral (C_θ, C_σ) se ven modificados, debido a las variaciones

espaciales del campo de velocidad de corrientes (Ecuaciones 3-2 y 3-7). Las ecuaciones del modelo de oleaje (WWIII) (ecuaciones 3-10 hasta 3-13) presentan la refracción de la onda y el cambio de frecuencias, debido a las variaciones espaciales del campo de corrientes y de la profundidad. En estas ecuaciones el término U hace referencia al campo de velocidad de corrientes superficiales. En los capítulos 4 y 5, los resultados se obtuvieron definiendo U a partir de los datos de corrientes superficiales de AVISO. En este caso, se tiene en cuenta un campo de velocidad de corrientes ponderado, que se obtiene a partir de los perfiles de velocidad de la base de datos GLORYS. Se analiza el efecto de la interacción ola corriente en el comportamiento de los parámetros escalares y espectros de energía del oleaje, teniendo en cuenta las corrientes superficiales ponderadas de los perfiles de velocidad de la base de datos de reanálisis de GLORYS.

Los perfiles de corrientes obtenidos de la base de datos de reanálisis de GLORYS son transformados usando la formulación propuesta por (Stewart & Joy, 1974), que luego fue extendida a profundidades finitas por (Kirby & Chen, 1989). Como explicaron Stewart & Joy (1974) y Kirby & Chen (1989), cuando las corrientes no son verticalmente uniformes, la relación de dispersión de las ondas de gravedad depende de la cizalladura vertical de la corriente. Para las olas de aguas poco profundas, las corrientes en toda la columna de agua afectan la dinámica de las olas, mientras que en las olas de aguas profundas, las corrientes cercanas a la superficie tienen un impacto más fuerte en la propagación de las olas. La formulación dada por Kirby & Chen (1989) considera el efecto de la profundidad relativa del agua. Esta formulación permite estimar el campo de velocidad de corrientes ponderado, teniendo en cuenta el efecto del perfil de velocidad. Las expresiones se obtienen a partir de las ecuaciones que rigen las variaciones locales de la onda de superficie y la ecuación de continuidad, y explican la observación de que las ondas cortas sienten la corriente cerca de la superficie mientras que las ondas más largas son alteradas por las corrientes que se extienden desde la superficie hasta profundidades más grandes. El campo de velocidad ponderado (U_p, V_p) se determina a partir de las siguientes expresiones, teniendo en cuenta las componentes de velocidad zonal y meridional del campo de corrientes GLORYS $(U(z), V(z))$ (Stewart & Joy, 1974; Kirby & Chen, 1989).

$$U_p = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \int_{-d}^0 U(z) \cosh(2k(d+z)) dz \quad (6-1)$$

$$V_p = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \int_{-d}^0 V(z) \cosh(2k(d+z)) dz \quad (6-2)$$

Donde $U(z) = (U(z), V(z))$ son las componentes de los perfiles de velocidad del campo de corrientes de GLORYS, d es la profundidad de integración, a partir de la cual se considera el efecto de las corrientes, k es el valor de número de onda asociado al periodo pico (T_p) para cada nodo de solución de la malla teniendo en cuenta las corrientes superficiales, y z es la profundidad a la que se encuentran los datos de velocidad $(U(z), V(z))$. Esta formulación ha sido empleada en el acople de modelos para estudiar el efecto de la interacción ola-corriente en aguas profundas y aguas someras (Olabarrieta et al., 2012; Sikirić et al., 2013; Benetazzo et al., 2013).

Esquema de la metodología

La Figura 6-1 presenta el esquema de la metodología propuesta para tener en cuenta el efecto del perfil de corrientes en la modelación espectral, y de esta forma analizar el efecto de la interacción ola-corriente en la estimación de los parámetros escalares y espectros de energía del oleaje. La metodología está dividida en tres partes. La primer parte está relacionada con los datos y simulaciones necesarias para calcular las variables de la ecuación de ponderación, la segunda parte está relacionada con el método para calcular el campo de corrientes ponderado. La tercer parte está relacionada con la modelación espectral que tiene en cuenta el campo de vientos de huracán HURNARR y el campo de corrientes ponderado de GLORYS. Se obtienen los resultados de los parámetros escalares (H_s , T_p) y espectros de energía ($E(f)$, $E(f, \theta)$), y se compara con las mediciones de las boyas de la NOAA.

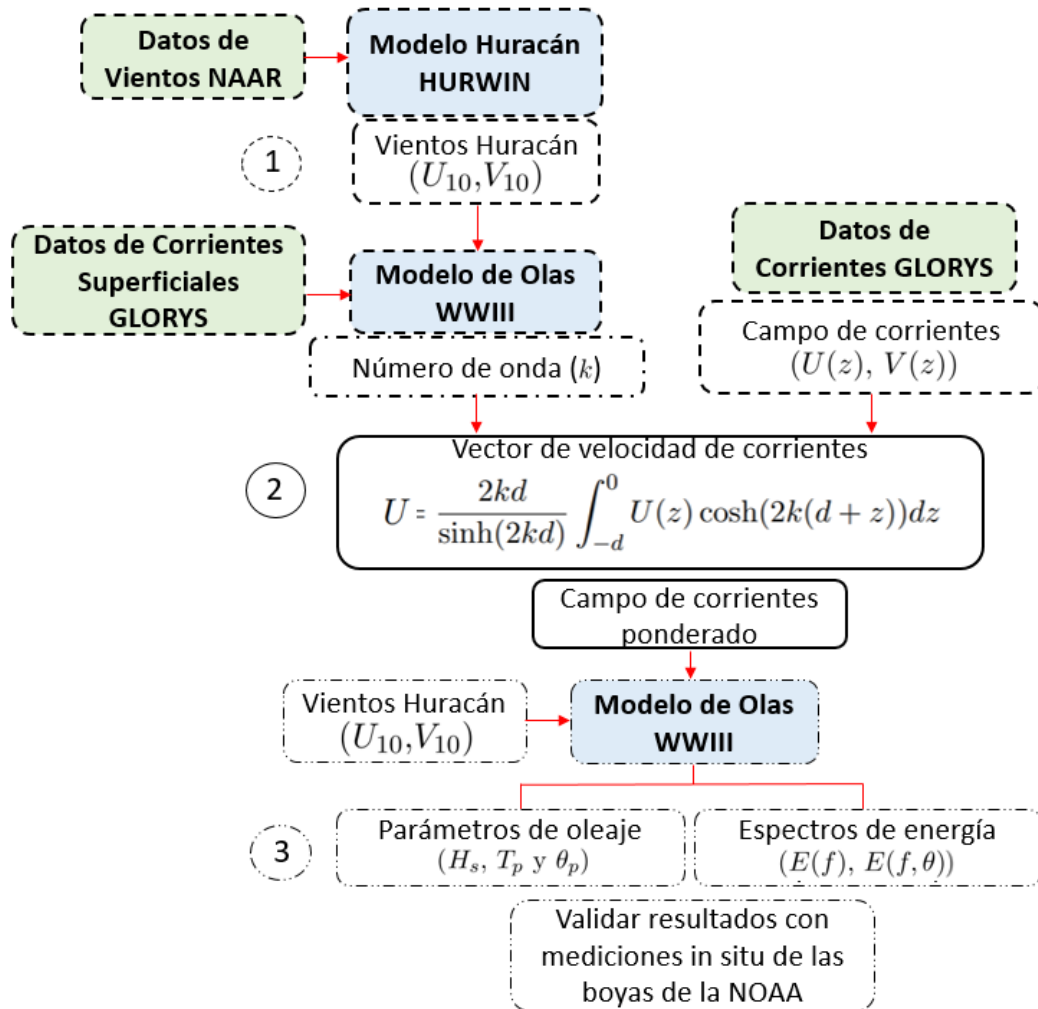


Figura 6-1.: Metodología para incluir el efecto del perfil de velocidad de corrientes en la modelación espectral. (1) Cálculo de las variables definidas en la ecuación de ponderación de corrientes, (2) Método de integración para obtener el campo de corrientes ponderado, (3) Modelación espectral de oleaje y validación de los resultados obtenidos de los parámetros escalares y espectros de energía.

Las bases de datos de vientos (ERA5, NARR, QuikSCAT, ERA INTERIM) subestiman la magnitud y la distribución espacial del campo de velocidad de vientos en condiciones extremas de huracán (Cavaleri & Sclavo (2006); Sharma & D'Sa (2008); Ruti et al. (2008); Montoya (2013)). En la primer parte de la metodología, el campo de vientos de huracán de la base de datos NARR es corregido con el modelo paramétrico HURWIN, que permite reconstruir el campo de vientos $V(r)$, a partir de los datos de velocidad máxima y ubicación con respecto al ojo del huracán, para cada instante de tiempo (Ecuaciones 3-37 y 3-38). De esta manera se obtiene una mejor estimación de la distribución espacial y la magnitud del campo de velocidad de vientos en condiciones extremas de huracán, durante el paso de los huracanes Katrina y Rita. Se obtiene el campo de velocidad a 10 metros de altura de la superficie del océano (U_{10}, V_{10}) , con una resolución espacial de aproximadamente 18 kilómetros y una resolución temporal de cuatro datos por día. El campo de vientos es el principal forzador en el modelo de oleaje (WWIII). Las simulaciones numéricas, se realizan teniendo en cuenta la configuración y calibración del modelo presentan en la capítulo 4. En la primer parte de la metodología se realiza la modelación espectral del oleaje, teniendo en cuenta el campo de vientos de los huracanes Rita y Katrina, que combina los datos de vientos NARR y el modelo paramétrico HURWIN, además se considera en la simulación el efecto de las corrientes superficiales de la base de datos de reanálisis GLORYS. Con la simulación numérica se obtiene el espectro direccional de energía para cada nodo definido en la malla de solución y en los diferentes instantes de tiempo, durante el paso de ambos huracanes.

Una vez calculado el espectro direccional de energía en todo el dominio de solución, se obtiene el valor de la frecuencia pico, asociada al máximo valor de energía en el espectro escalar de frecuencias, para cada instante de tiempo. Teniendo en cuenta el campo de frecuencias calculado y la relación de dispersión de la teoría lineal de ondas (ecuación 3-3), se obtiene el campo de número de onda k , para cada nodo de la malla y para cada instante de tiempo, durante el periodo de simulación. El número de onda es una de las variables necesarias para calcular el campo de corrientes ponderado, lo que implica, que para usar la ecuaciones 6-1 y 6-2, se considera la presencia de oleaje, esto dado que sin oleaje no es posible obtener un valor inicial del número de onda para obtener el valor ponderado de la corriente. Los demás términos de las ecuaciones 6-1 y 6-2, corresponden a la profundidad d a partir de la cual se tiene en cuenta el efecto del campo de corrientes en el valor ponderado, y los perfiles del campo de corrientes $U(z) = (U(z), V(z))$ en las diferentes profundidades z , que se obtienen de los datos de reanálisis de GLORYS.

En la segunda parte de la metodología, teniendo los datos de los términos de la ecuación de ponderación (número de onda k , profundidad de integración d y campo de corrientes $(U(z), V(z))$), se realizó la integración numérica. Se calculó el campo de corrientes ponderado U , considerando profundidades d de 15, 30, 45 y 60 metros, como límites de integración. Se consideran estos valores de profundidad de integración para evaluar los cambios en el comportamiento de los parámetros escalares y espectros de energía, considerando el efecto del campo de corrientes a partir de diferentes profundidades, variando 15 metros, desde la superficie. La integral se realiza por el método del trapecio simple, discretizando el perfil de velocidades en trapecios, considerando cada pareja de valores de la profundidad y el valor correspondiente en el perfil de velocidad $(z, U(z))$. La integral se

soluciona considerando cada componente de la velocidad, es decir se obtiene el campo de corrientes ponderado (U_p, V_p), para luego ingresar los datos en el modelo de oleaje (WWIII) (ecuaciones 3-10 hasta 3-13).

La parte final de la metodología consiste en la modelación espectral del oleaje, teniendo en cuenta las condiciones extremas de huracán, con los datos de vientos combinados HURNARR (U_{10}, V_{10}) y el campo de corrientes ponderado (U_p, V_p), que se obtiene a partir de los perfiles de velocidad de corrientes de la base de datos GLORYS. Los resultados obtenidos de los parámetros escalares del oleaje (H_s, T_p) y espectros de energía ($E(f), E(f, \theta)$), son comparados con la información disponible de las mediciones de las boyas de la NOAA.

6.2. Campo de corrientes ponderado

Se estudió el comportamiento del patrón espacial de las corrientes ponderadas que se obtienen a partir de los perfiles de velocidad de GLORYS usando las ecuaciones 6-1 y 6-2, que permiten estimar un valor de corrientes ponderado, teniendo en cuenta la variación de las corrientes en la vertical. Se realizaron simulaciones teniendo en cuenta diferentes profundidades de integración, para los huracanes Katrina y Rita. El campo de corrientes ponderado (U_p, V_p) se obtuvo para profundidades d de 15, 30, 45 y 60 metros, las cuales fueron definidas para analizar la variación que produce incrementar la profundidad de integración, es decir, la profundidad a partir de la cual se considera el efecto de las corrientes en la simulación. La Figura 6-2 presenta el campo de corrientes ponderado (U_p, V_p) a partir de los perfiles de velocidad de corrientes de la base de datos de reanálisis de GLORYS, para una profundidad de integración de 30 metros. Los datos corresponden a la fecha 22/09/2005 12:00:00, durante el paso del huracán Rita. En este instante el huracán es categoría 5. En la gráfica se presenta la comparación del patrón espacial de las corrientes ponderadas y las corrientes superficiales, y las diferencias ($U_p - U_s, V_p - V_s$), para la velocidad zonal (U) y meridional (V).

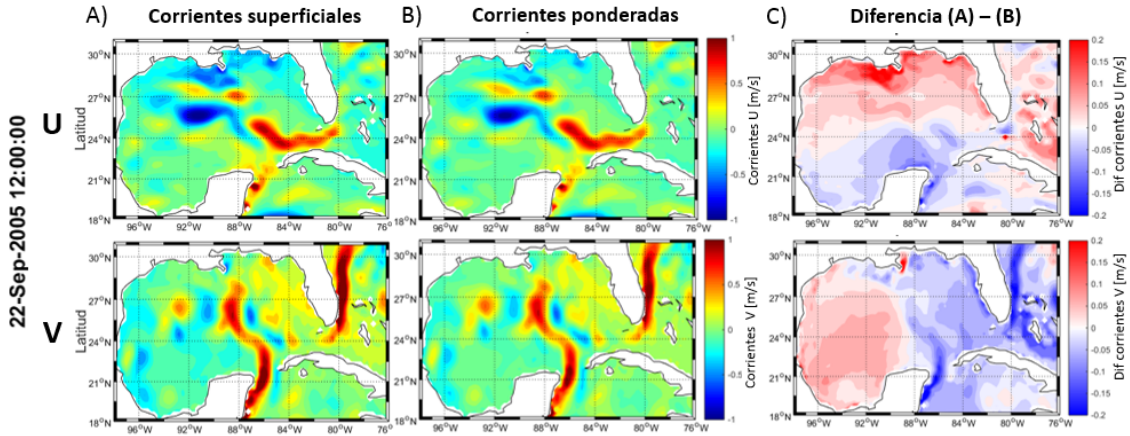


Figura 6-2.: Campo de corrientes ponderado. (A) Campo de velocidad corrientes superficiales GLORYS, (B) Campo de corrientes ponderadas, y (C) Diferencia entre el campo de corrientes ponderadas y el campo de corrientes superficiales. El campo de corrientes ponderado corresponde a una profundidad de integración de 30 metros, durante el paso del huracán Rita, en categoría 5. Los datos corresponden a la fecha 22/09/2005 12:00:00.

La Figura 6-3 presenta el campo de corrientes ponderado usando los perfiles de velocidad de la base de datos de reanálisis de GLORYS, durante el paso del huracán Rita. Se presenta el campo de velocidad de corrientes ponderado zonal y meridional (U_p , V_p), considerando diferentes profundidades de integración d de 15, 30, 45 y 60 metros, además se presenta las diferencias de velocidad entre el campo de corrientes ponderado y el campo de corrientes superficial. La diferencias son estimadas como ($U_p - U_s$ y $V_p - V_s$). Los resultados obtenidos con las ecuaciones 6-1 y 6-2 de la velocidad de corrientes corresponden a la fecha 22/09/2005 12:00:00.

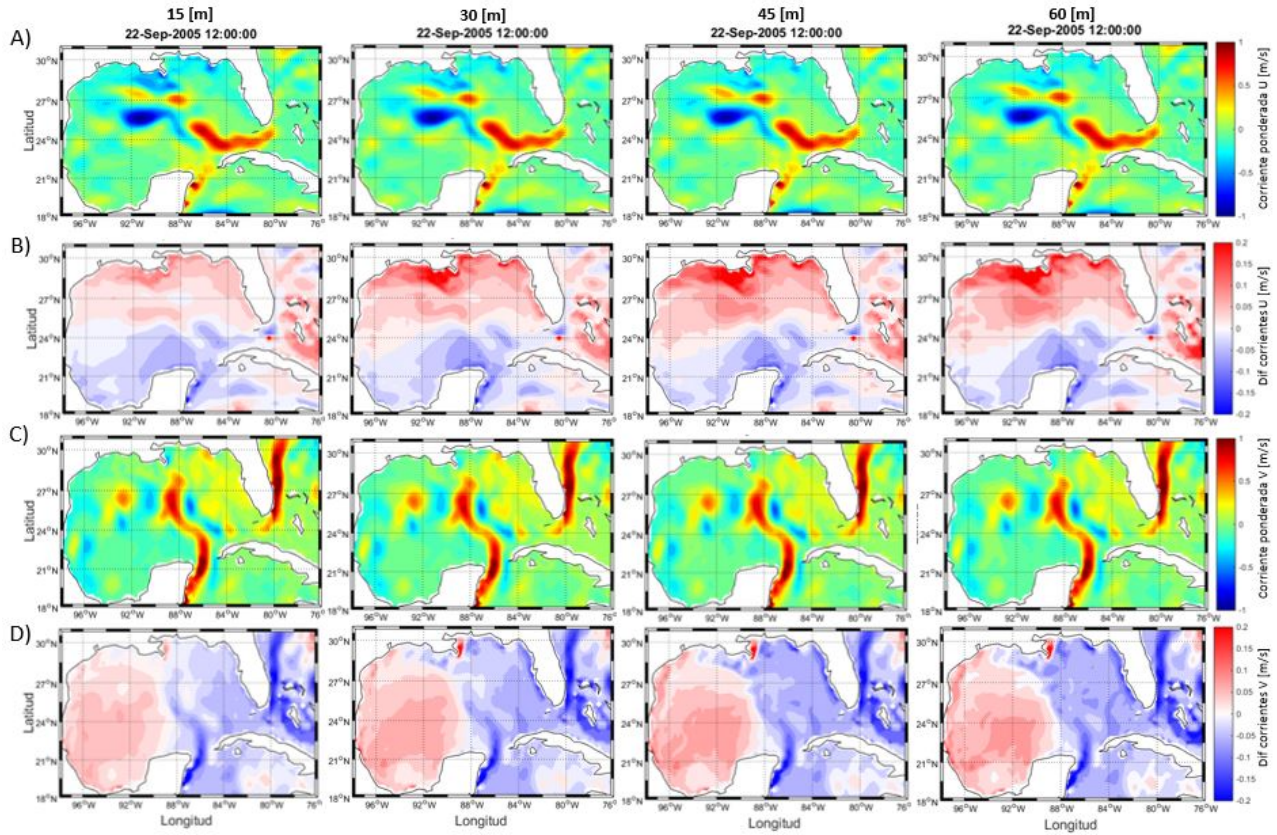


Figura 6-3.: Campo de corrientes ponderado para las diferentes profundidades de integración. (A) Velocidad zonal de corrientes, (B) Diferencia de velocidad zonal, (C) Velocidad meridional de corrientes, y (D) Diferencia velocidad zonal.

En la Figura 6-2, se observa que el campo de corrientes ponderado presenta variaciones en el patrón espacial en toda la zona de estudio, en comparación con las corrientes superficiales. El campo de corrientes ponderado de la velocidad zonal (U_p), presenta un incremento de la velocidad en la parte Norte de Golfo de México con valores que oscilan entre 0 y 0,25 m/s , donde el mayor incremento se presenta cerca a la plataforma continental (Louisiana). Además, se presenta un incremento que va hasta 0,15 m/s de la magnitud en la velocidad zonal de la corriente de la Florida. La velocidad zonal, presenta una disminución de las corrientes en el sur del Golfo de México, cerca a la península de Yucatán, con valores que oscilan entre $-0,15$ y 0 m/s . En la parte central del Golfo de México hay una zona de transición donde las diferencias son cercanas a cero, y divide la zona donde se produce incremento de la zona donde se produce disminución de la velocidad. En el caso de la

velocidad meridional (V_p) presenta un incremento en el oeste del Golfo de México y una disminución en el este, con diferencias en la velocidad de la corriente que oscilan entre $-0,30$ y $0,20$ m/s . Se observa una disminución de la velocidad meridional de la corriente de Florida. El campo de corrientes ponderado presenta un patrón espacial similar a la velocidad zonal y meridional, en comparación con las corrientes superficiales, aunque variando la magnitud de la velocidad.

En la Figura **6-3** se observa, que a medida que incrementa la profundidad de integración (d), se presentan mayores diferencias en la magnitud de la velocidad de corrientes ponderadas (U_p, V_p), en comparación con las corrientes superficiales (U_s, V_s). En el Norte del Golfo de México, cerca a Louisiana, al considerar una profundidad de integración de 15 m se presentan diferencias que van hasta $0,08$ m/s de la velocidad zonal (U_p). Este valor incrementa a medida que se considera una profundidad mayor, llegando a diferencias de $0,25$ m/s al considerar la profundidad de 60 m , en comparación con las corrientes superficiales. Similarmente, cerca a la península de Yucatán, en el sur de Golfo de México, se presenta una disminución de la velocidad de las corrientes, y a medida que incrementa la profundidad de integración desciende la velocidad de las corrientes ponderada. En el caso de la velocidad meridional (V_p), al considerar una profundidad de 15 m , se presenta un incremento de la velocidad que va hasta $0,05$ m/s en el oeste del Golfo de México, y una disminución de $0,1$ m/s , en comparación la velocidad meridional de las corrientes superficiales. Al incrementar la profundidad de integración hasta 60 m , las diferencias incrementan hasta $0,1$ m/s en el oeste y $-0,15$ m/s en el este del Golfo de México. Se observa que la corriente de Louisiana presentan un patrón espacial similar para las diferentes profundidades de integración y la magnitud no varía de forma significativa, en comparación con las variaciones que se producen en el Golfo de México.

Se observa que las diferencias en la velocidad zonal y meridional de las corrientes, es más significativa a medida que incrementa la profundidad de integración. A partir de 45 metros de profundidad, las diferencias en el patrón espacial y temporal que presenta el campo de corrientes ponderado, empieza a disminuir. A partir de 60 metros las variaciones en las corrientes ponderadas no son significativas, presentando un comportamiento aproximadamente igual de los parámetros escalares y espectros de energía que se obtienen con la simulación numérica. En el caso del huracán Katrina, el comportamiento del patrón espacial de las corrientes ponderadas, al tener en cuenta las diferentes profundidades de integración, es similar al paso del huracán Rita. Las diferencias en la magnitud de la velocidad zonal y meridional, para ambos huracanes, presentan diferencias porcentuales que oscilan entre -40% y 40% , con valores picos que alcanzan errores porcentuales de 100% .

6.3. Series temporales de los parámetros escalares del oleaje

Se analiza el comportamiento de las series temporales de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p) del oleaje, teniendo en cuenta el efecto del campo de corrientes ponderado (U_p , V_p) en la modelación. Las Figuras 6-4 y 6-5 presentan el resultado obtenido con la modelación de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), además, se presentan las diferencias de los parámetros escalares durante el periodo que corresponde al paso del huracán Katrina. Se comparan las series temporales modeladas para las diferentes profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros, con los datos medidos por las boyas 42001 y 42039 de la NOAA presentadas en la Figura 4-9, y con la solución que se obtiene con las corrientes superficiales.

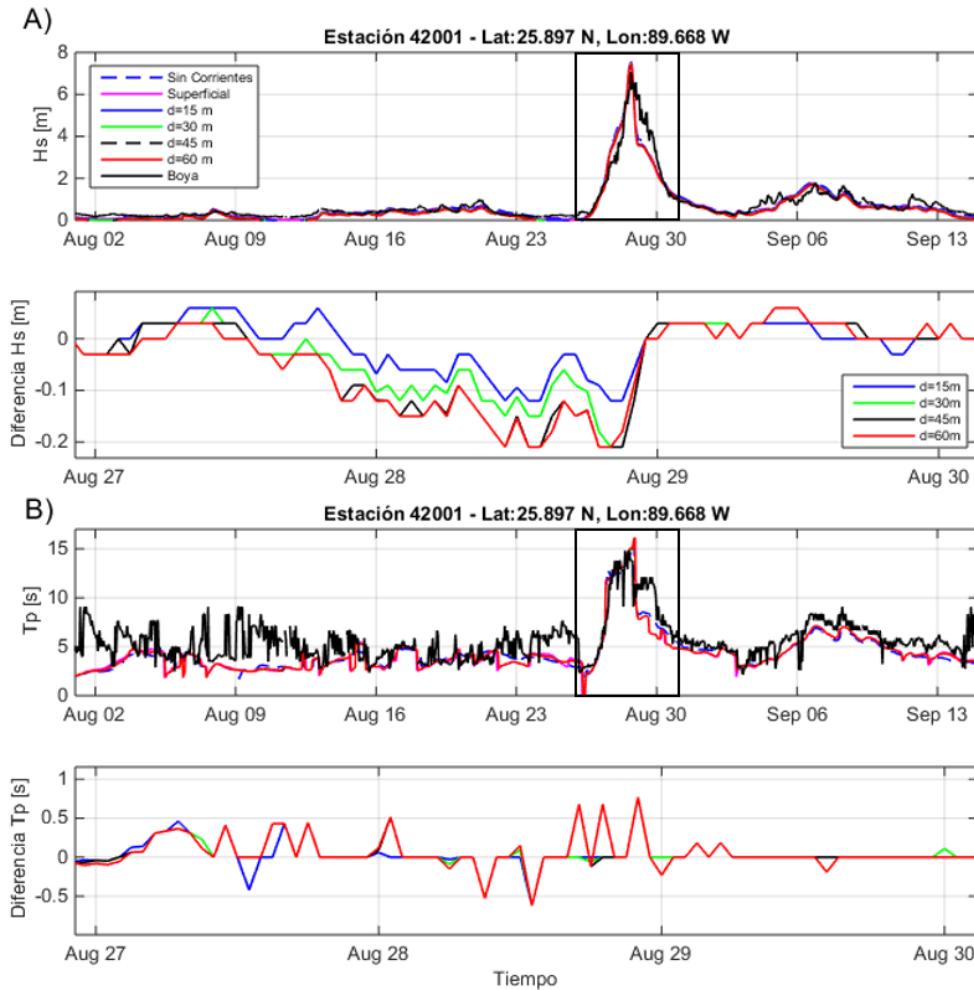


Figura 6-4.: Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Katrina. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencia de magnitud; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias de magnitud. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán.

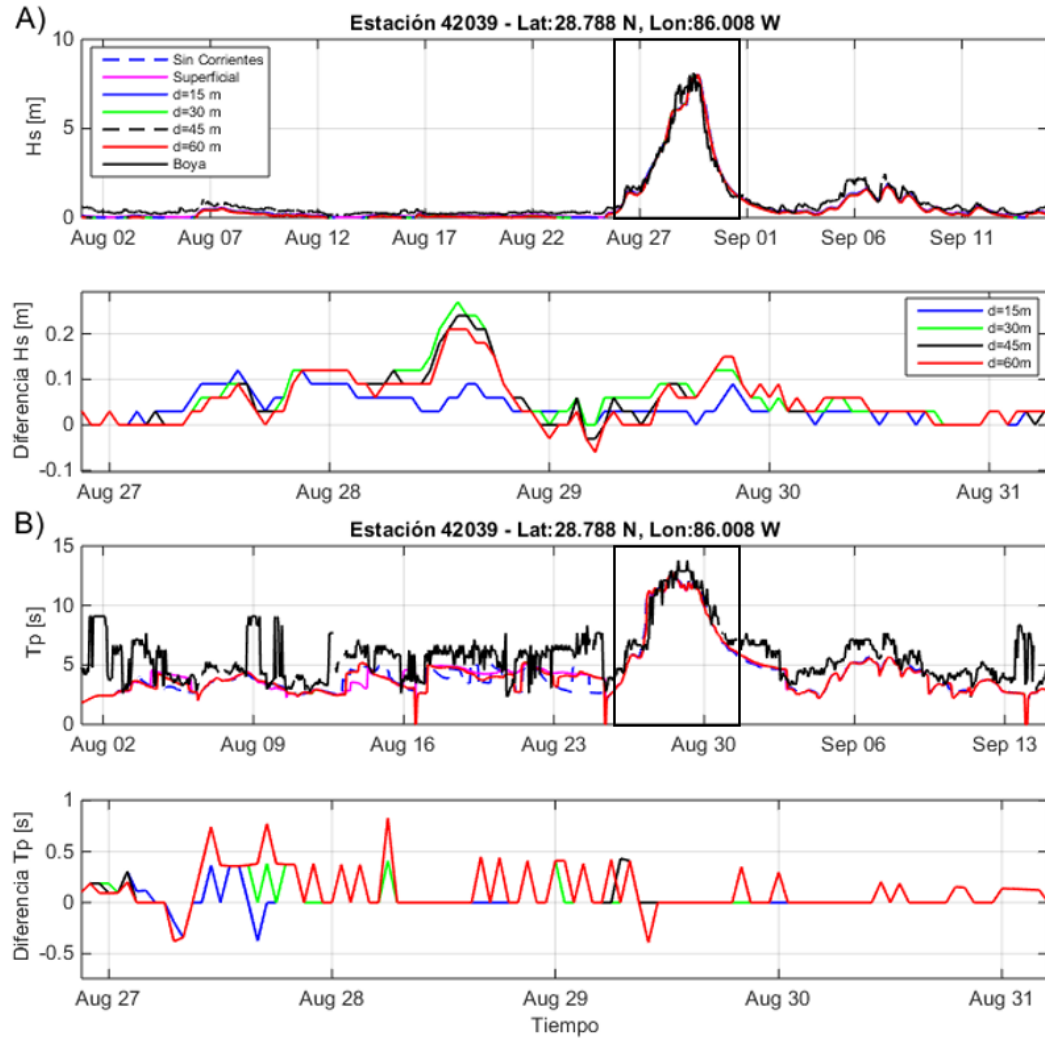


Figura 6-5.: Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Katrina. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencias de magnitud; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias de magnitud. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42039 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán.

En general, se observa que al tener en cuenta el efecto del campo de corrientes ponderado considerando diferentes profundidades de integración, no se presentan cambios significativos en la magnitud de H_s y T_p , al comparar la solución obtenida con la simulación que tiene en cuenta el campo de corrientes superficiales GLORYS y los datos medidos por las boyas de la NOAA. Las máximas diferencias que se presentan en la magnitud de los parámetros escalares, ocurren durante el periodo 27/08/2005 00:00:00 hasta 31/08/2005 00:00:00, que corresponde a los instantes en que el huracán Katrina, se encuentra más cerca de la boyas 42001 y 42039. En la parte A) de la Figura 6-4, se observa que la máxima diferencia que se presenta en la estimación de la altura de ola significativa (H_s), en la boya 42001, es de 0,21 metros, lo que corresponde a un error porcentual de 4%, en comparación con el resultado obtenido con la simulación que tiene en cuenta el campo de corrien-

tes superficiales de GLORYS. En la parte B), se observa que la máxima diferencia del periodo pico (T_p) que se presenta al incluir el campo de corrientes ponderado es de 0,7 segundos, lo que corresponde a un error porcentual del 6 %. En el caso de la boya 42039, las máximas diferencias son de 0,24 metros (4 %) de altura de ola significativa (H_s) y 0,7 segundos (5 %) de periodo pico (T_p).

Las Figuras 6-6 y 6-7 presentan el resultado obtenido con la modelación de las series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), además, se presentan las diferencias de los parámetros escalares durante el periodo que corresponde al paso del huracán Rita. Se comparan las series temporales modeladas para las diferentes profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros, con los datos medidos por las boyas 42001 y 42040.

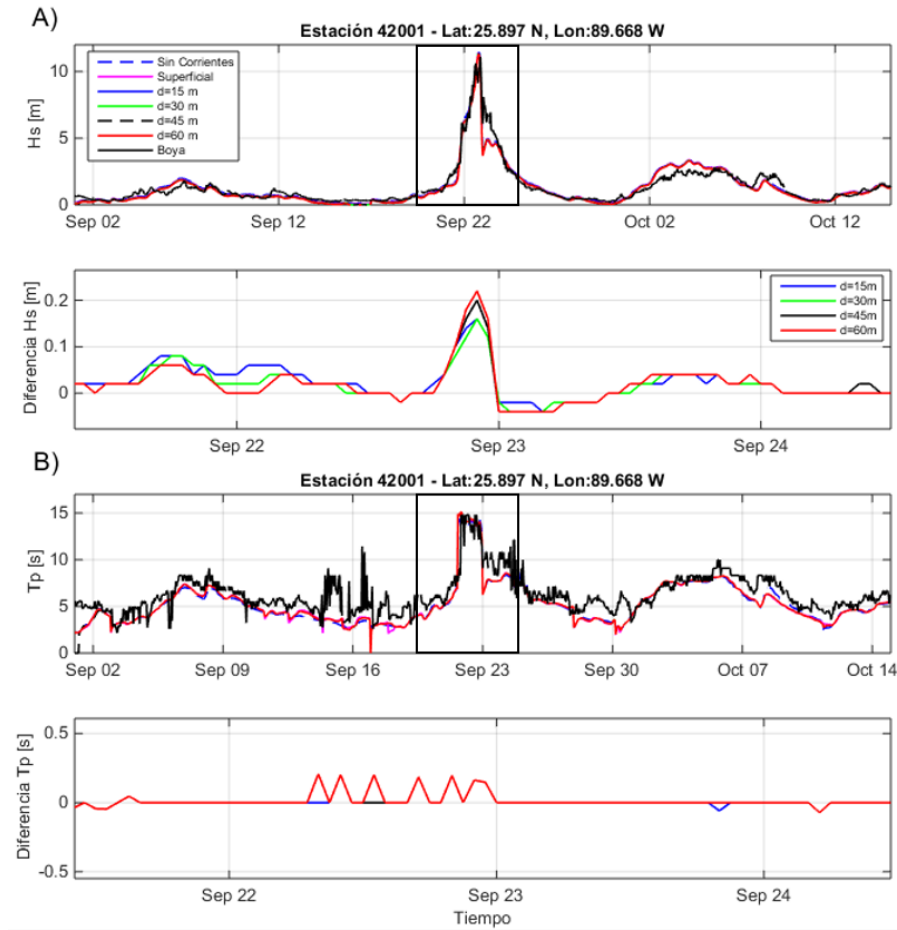


Figura 6-6.: Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Rita. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencias; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán.

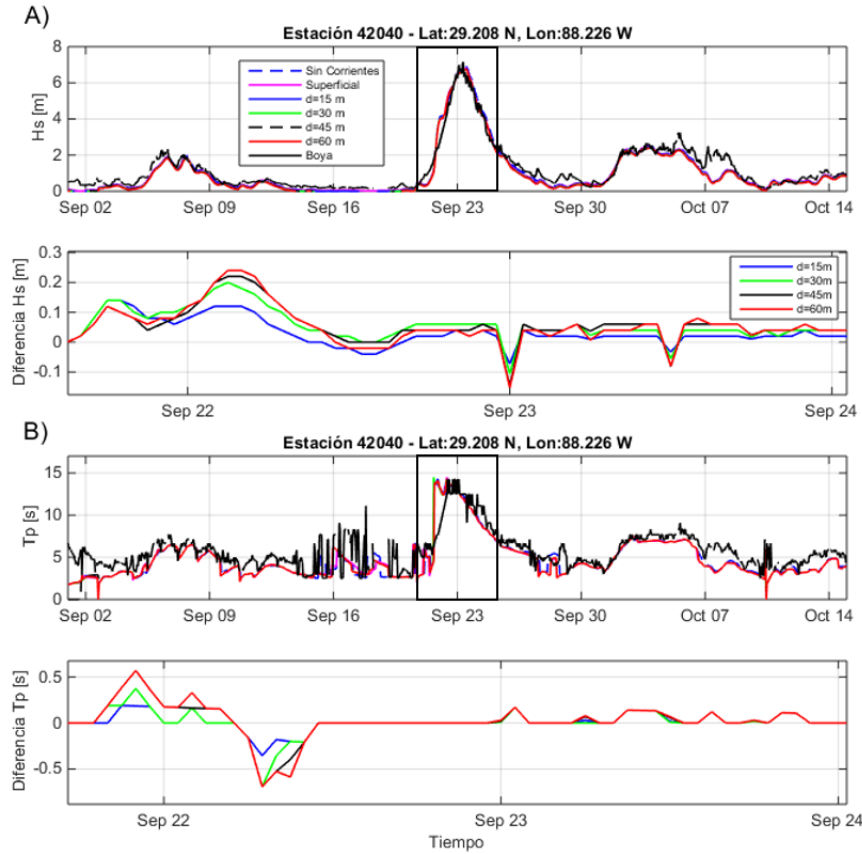


Figura 6-7.: Series temporales de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), para diferentes profundidades de integración, durante el paso del huracán Rita. (A) Serie temporal de altura de ola significativa (H_s) y diferencias; (B) Serie temporal de periodo pico (T_p) y diferencias. Se presenta la solución obtenida para profundidades de integración $d = 15$, $d = 30$, $d = 45$ y $d = 60$ metros. Los resultados se comparan con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la condición de huracán.

En el caso del huracán Rita, las máximas diferencias en la estimación de los parámetros escalares (H_s y T_p) se presentan en las fechas 21/09/2005 12:00:00 hasta 24/09/2005 12:00:00, que corresponden a los instantes, en que el huracán Rita, se encuentra más cerca de las boyas 42001 y 42040. En las series temporales obtenidas para la boya 42001, se observa que la máxima diferencia que se presenta es de 0,21 metros, lo que equivale a un error porcentual de 3% respecto al resultado obtenido con la simulación que tiene en cuenta el campo de corrientes superficiales de GLORYS. Con respecto al periodo pico (T_p), la máxima diferencia que se presenta al incluir el campo de corrientes ponderado es de 0,2 segundos, lo que corresponde a un error porcentual de 2%. En el caso la boya 42040, las diferencias son de 0,22 metros (4%) de altura de ola significativa (H_s) y 0,6 segundos (5%) de periodo pico (T_p). El error cuadrático medio de las series temporales de la altura de ola significativa (H_s) presenta diferencias porcentuales de aproximadamente 1% para las profundidades de integración $d = 15m$ y $d = 30m$, y 2% para las profundidades $d = 45m$ y $d = 60m$, durante el paso de los dos huracanes, en comparación con la simulación que tiene en cuenta el campo de corrientes superficiales GLORYS. El error cuadrático medio del periodo pico (T_p) presenta diferencias porcentuales de 1% para todas las profundidades de integración. Lo que

indica que al considerar el efecto de las corrientes ponderadas en la modelación espectral, no se presentan cambios significativos en la estimación de los parámetros escalares del oleaje, durante condiciones extremas de viento de huracán. En las gráficas que corresponden a la diferencia de altura de ola significativa (H_s) se observa que las variaciones entre la solución obtenida considerando una profundidad de integración de 45 (línea negra) y 60 metros (línea roja), no son significativas, lo que concuerda con el análisis espacial de la variación de la magnitud de las corrientes ponderadas, que al tener en cuenta una profundidad de integración de 60 metros, no se presenta una variación significativa en la magnitud de la velocidad ponderada, en comparación con la simulación que tiene en cuenta una profundidad de 45 metros.

6.4. Espectro escalar de frecuencias

Las Figuras 6-8 y 6-9 presentan la comparación del espectro escalar de energía de frecuencias ($E(f)$) calculado con el modelo de oleaje (WWIII) teniendo en cuenta el efecto de las corrientes ponderadas, para las diferentes profundidades de integración, durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, respectivamente. Los datos son comparados con los resultados obtenidos con la simulación que tiene en cuenta el campo de corrientes superficiales de GLORYS y los datos medidos del espectro escalar de frecuencias de la boya 42001 en el caso del huracán Katrina, y la boya 42040 para el caso del huracán Rita.

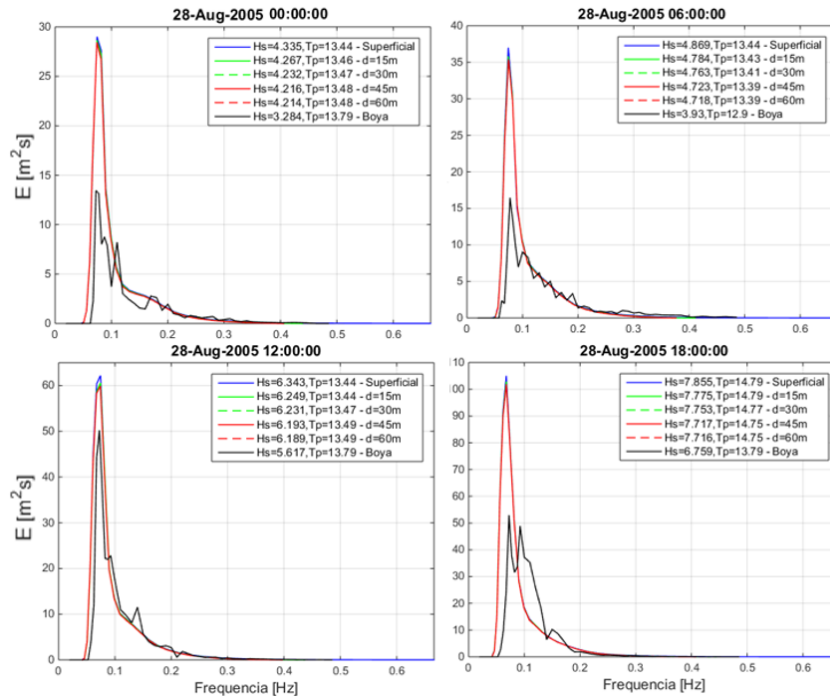


Figura 6-8.: Efecto de campo de corrientes ponderado en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42001 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00, con pasos de tiempo de 6 horas, el periodo corresponde al paso del Huracán Katrina. Además, se presenta la magnitud de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s , en metros) y periodo pico (T_p , en segundos), calculados a partir de los espectros modelados y los espectros medidos.

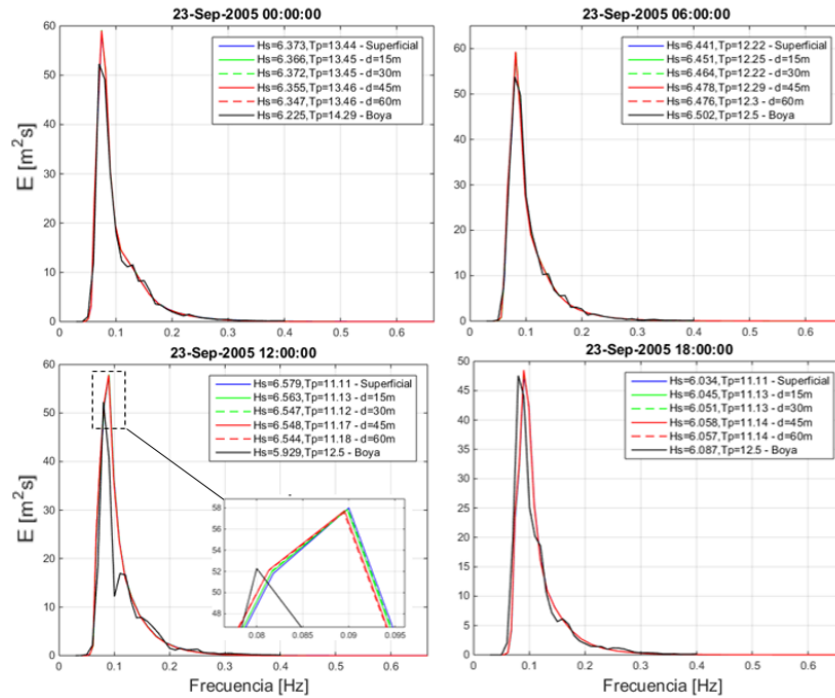


Figura 6-9.: Efecto del campo de corrientes ponderado en el comportamiento del espectro escalar de frecuencias. Comparación del espectro escalar modelado con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA. Se presentan los resultados obtenidos durante el periodo 23/09/2005 00:00:00 hasta 23/09/2005 18:00:00, con pasos de tiempo de 6 horas, el periodo corresponde al paso del Huracán Rita. Además, se presenta la magnitud de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s , en metros) y periodo pico (T_p , en segundos), calculados a partir de los espectros modelados y los espectros medidos.

De las Figuras 6-8 y 6-9, se observa que al incluir el efecto del campo de corrientes ponderado hay una mejor estimación del valor máximo de energía del espectro escalar de frecuencias, en comparación con los espectros medidos por la boya 42001, en el caso del huracán Katrina, y la 42040 en el caso del huracán Rita. A pesar de que la distribución de la energía en las frecuencias es aproximadamente igual, hay variaciones en la estimación del valor máximo de energía. Los valores obtenidos de los parámetros escalares de energía, al tener en cuenta el espectro escalar, presentan un mejor ajuste en comparación con los parámetros calculados con el espectro escalar medido por la boya. En el caso del huracán Katrina, en los instantes de tiempo analizados (28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00), el huracán incrementa de categoría 3 a categoría 5, reduciendo la distancia con respecto a la boya 42001, la cual se ubica en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán. En estos instantes las simulaciones con corrientes sobrestiman el valor máximo de energía, sin embargo, al incluir el campo de corrientes ponderado, se presenta un mejor ajuste, con respecto a los datos medidos, presentando un valor más aproximado, con la simulación que tiene en cuenta el perfil de corrientes, desde una profundidad de integración de 60 metros.

A partir de los espectros escalares de energía, se obtiene una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje. Las diferencias que se presentan en la magnitud de altura de ola significativa (H_s) van hasta 17 centímetros, y diferencias de hasta 0,03 segundos del periodo pico (T_p), en comparación con el valor obtenido con la simulación que tiene en cuenta las corrientes superficiales

de GLORYS. En el caso del huracán Rita, los instantes de tiempo analizados (23/09/2005 00:00:00 hasta 23/09/2005 18:00:00), corresponde a la categoría 4 del huracán, y la boya 42040 se ubica en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante II), las diferencias que se presentan en la magnitud de la energía en el espectro escalar, y los parámetros escalares del oleaje, son menores en comparación, a la boya 42001 en el caso del huracán Katrina. Las diferencias que se presentan en la magnitud de altura de ola significativa (H_s) van hasta 5 centímetros, y diferencias de hasta 0,03 segundos del periodo pico (T_p), en comparación con el valor obtenido con la simulación que tiene en cuenta las corrientes superficiales. Las diferencias más significativas se presentan hasta una profundidad de integración de 45 metros, al considerar la profundidad de 60 metros las variaciones del espectros escalar de frecuencias y los parámetros escalares del oleaje son menos significativas, lo que indica que al considerar el campo de velocidad de corrientes a una profundidad mayor a 60 metros, no presentan cambios significativos en las estimación de los espectros escalares de energía y parámetros escalares del oleaje. La Figura 6-10 presenta el error cuadrático medio que se obtiene al comparar los espectros escalares modelados y el espectro medido por las boyas 42001 en el caso del huracán Katrina, y 42040 en el caso del huracán Rita. Se obtiene un valor del error cuadrático medio de la energía (ver ecuación 5-2), para cada instante de tiempo del huracán, y el error porcentual del error cuadrático medio (ver ecuación 5-3). Se presenta el valor del RMSE considerando las diferentes profundidades de integración (ver Figura 5-1). El recuadro indica los instantes de tiempo, en los cuales el huracán se encuentra más próximo a la boya.

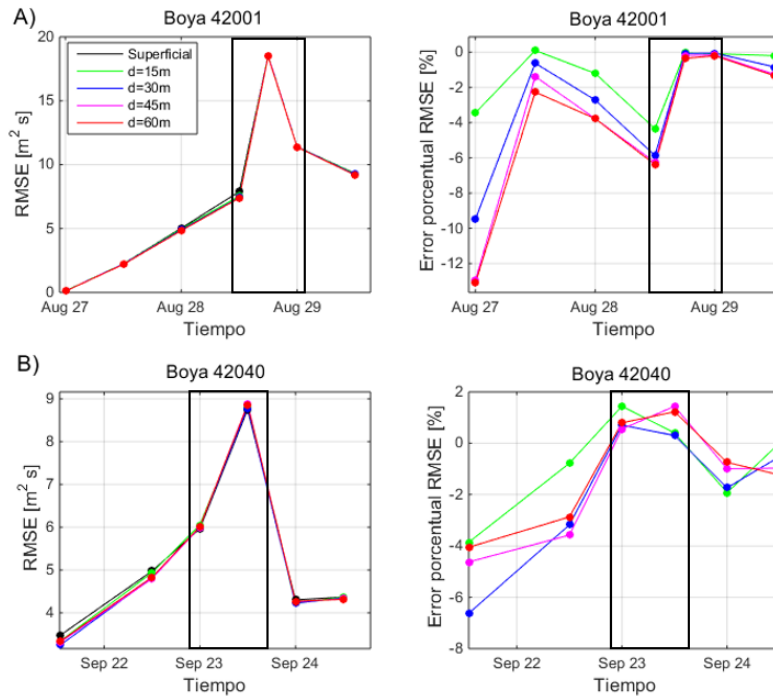


Figura 6-10.: Error cuadrático medio y error porcentual del espectro escalar de energía. (A) Comparación de los espectros escalares modelados con los espectros medidos por la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (B) Comparación de los espectros escalares modelados con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la máxima categoría del huracán.

En general, se observa que durante el paso de los huracanes, se presenta una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias $E(f)$ al tener en cuenta el efecto del campo de corrientes ponderado, en comparación con el espectro de frecuencias medido por la boya 42001 en el caso del huracán Katrina y la boya 42040 en el caso del huracán Rita. En la mayoría de instantes de tiempo analizados, se presenta una disminución del error cuadrático medio al comparar los espectros modelados con los espectros medidos. En algunos instantes de tiempo se presenta una disminución del error cuadrático medio que alcanza diferencias porcentuales de 12 % para una profundidad de integración $d = 60$ metros, en la boya 42001, durante el paso del huracán Katrina y diferencias porcentuales del RMSE de 6,5 % para una profundidad de integración de $d = 30m$, en la boya 42040, durante el paso del huracán Rita. Esto indica que a pesar de no presentarse diferencias significativas en la magnitud de la energía en el espectro escalar de energía, al tener en cuenta las corrientes ponderadas, se presenta una mejor estimación del espectro escalar de frecuencias y de los parámetros escalares del oleaje, en algunos instantes de tiempo, durante el paso de los huracanes Katrina y Rita.

6.5. Espectro direccional de energía

Se analiza el efecto del campo de corrientes ponderado de los perfiles de corrientes de GLORYS, en el comportamiento del espectro direccional de energía del oleaje ($E(f, \theta)$). Para comparar los resultados obtenidos con la modelación espectral se selecciona la boya 42001 en el caso del huracán Katrina, y la boya 42040 en el caso del huracán Rita. La Figura 6-11 presenta la comparación del espectro direccional de energía modelado, para las diferentes profundidades de integración (d) y el espectro medido por la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 28/08/2005 12:00:00, para las diferentes profundidades de integración, en este instante el huracán presentan categoría 5 y se encuentra más cerca de la boya, a una distancia de 220 kilómetros.

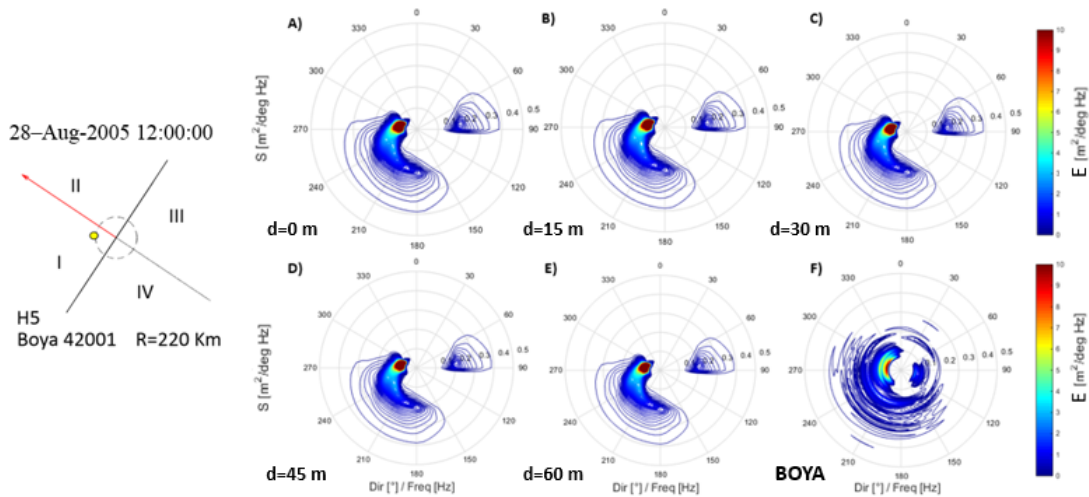


Figura 6-11.: Efecto del campo de corrientes ponderado en el comportamiento del espectro direccional de energía, durante el paso del huracán Katrina. (A) Espectro con corrientes superficiales, (B) Espectro para $d = 15$ metros, (C) Espectro para $d = 30$ metros, (D) Espectro para $d = 45$ metros, (E) Espectro para $d = 60$ metros, y (F) Espectro medido por la boya 42001.

La Figura 6-12 presenta la comparación del espectro direccional de energía modelado, para las diferentes profundidades de integración (d) y el espectro medido por la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Se presentan los resultados obtenidos para la fecha 23/09/2005 00:00:00, para las diferentes profundidades de integración, en este instante el huracán presentan categoría 5 y se encuentra más cerca de la boya, a una distancia de 544 kilómetros.

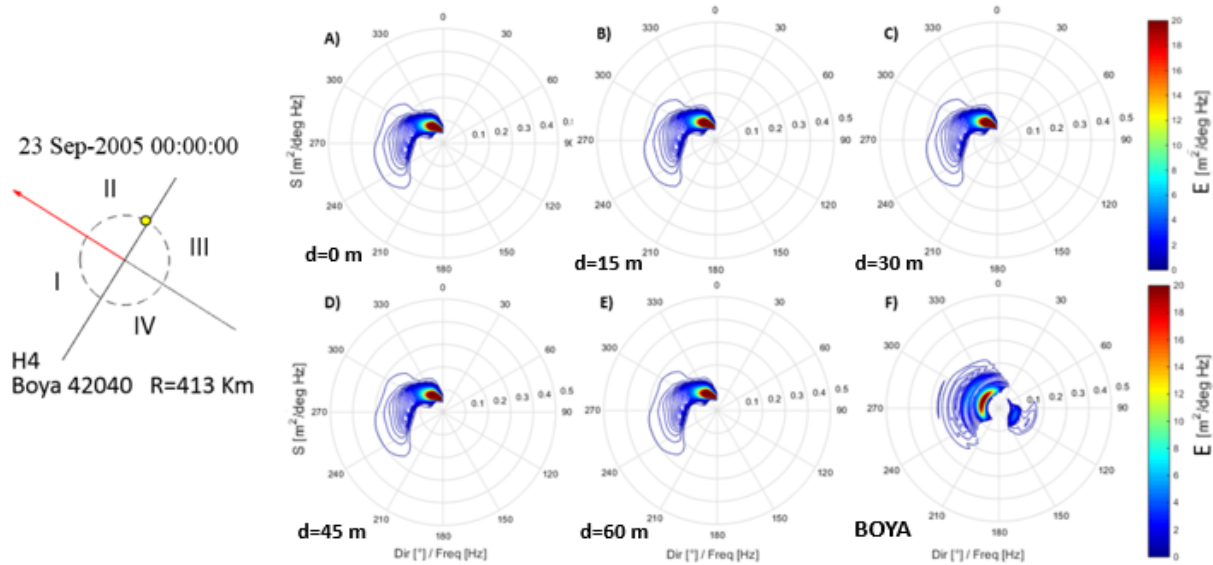


Figura 6-12.: Efecto del campo de corrientes ponderado en el espectro de energía, durante el paso del huracán Rita. (A) Espectro con corrientes superficiales, (B) Espectro para $d = 15$ metros, (C) Espectro para $d = 30$ metros, (D) Espectro para $d = 45$ metros, (E) Espectro para $d = 60$ metros, y (F) Espectro medido por la boya 42040.

En el caso del huracán Katrina, en la fecha 28/08/2005 12:00:00, la boya 42001 se encuentra en la parte frontal izquierda del huracán (cuadrante I), a 220 kilómetros del centro de la tormenta. En este instante el huracán alcanza la categoría 5. El efecto del campo de corrientes ponderado, considerando las diferentes profundidades de integración, no presenta variaciones significativas en el comportamiento del espectro direccional de energía, en comparación con la simulación que se obtiene con el campo de corrientes superficiales de GLORYS. A pesar de presentarse variaciones en la magnitud del campo de corrientes al considerar las diferentes profundidades de integración, no se presenta una redistribución considerable de la energía en el espectro direccional. En el caso del huracán Rita, en la fecha 22/09/2005 00:00:00 el huracán es categoría 4, y la boya 42040 está ubicada a una distancia de 413 del centro de la tormenta, ubicada en el cuadrante frontal derecho del huracán (cuadrante II). Se presenta un caso similar al huracán Katrina, donde el efecto de las corrientes en profundidad, no producen un efecto significativo en la distribución de la energía en el campo de coordenadas (f, θ) . Para una mejor visualización de la información, se calcula el RMSE de los valores que corresponden a cada pareja de datos de frecuencia y dirección (σ, θ) para el espectro modelado (EM) y el espectro medido (EO) por la boya de la NOAA, con la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (EM(f_i, \theta_j) - EO(f_i, \theta_j))^2}{m \times n}} \quad (6-3)$$

La Figura 6-13 presenta el error cuadrático medio que se obtiene a partir de los resultados de la modelación espectral incluyendo las corrientes superficiales y ponderadas, y los datos de las mediciones *in situ* de las boyas de la NOAA. Para cada dirección corresponde un espectro que dependen de las frecuencias, al cual se le calcula el error cuadrático medio de la energía del oleaje para cada una de las series de frecuencias. De igual forma, para cada frecuencia corresponde un espectro de direcciones, al cual se le estima el error cuadrático medio. El gráfico muestra el comportamiento del error cuadrático medio en cada una de las direcciones y las frecuencias del espectro obtenidos para las boyas 42001 y 42040 en los instantes comprendidos entre 28/08/2005 00:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00 en intervalos de 6 horas.

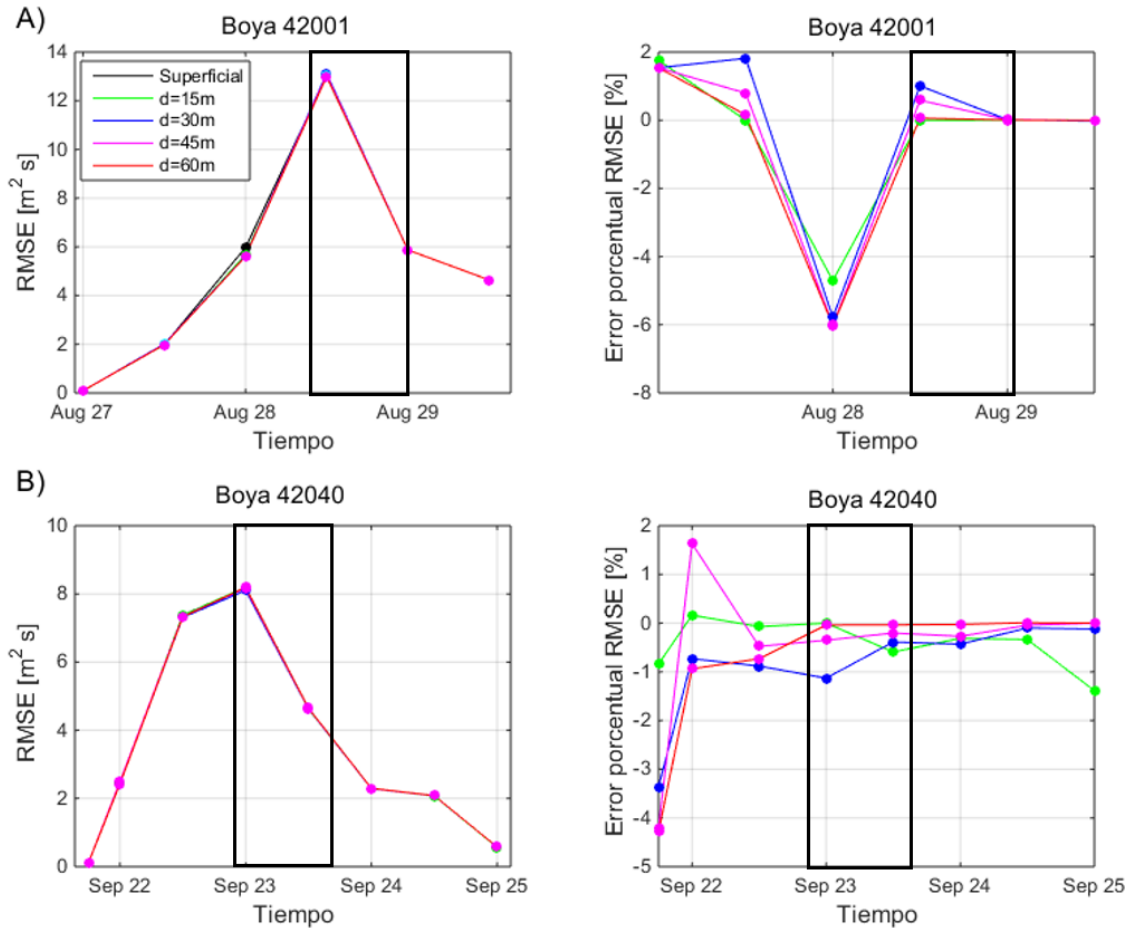


Figura 6-13.: Error cuadrático medio y error porcentual del espectro direccional de energía. (A) Comparación de los espectros direccionales modelados con los espectros medidos por la boya 42001 de la NOAA, durante el paso del huracán Katrina. (B) Comparación de los espectros direccionales modelados con los datos medidos por la boya 42040 de la NOAA, durante el paso del huracán Rita. Los recuadros negros indican los instantes donde se presenta la máxima categoría del huracán.

En el caso de la boya 42001, en el primer instante de tiempo analizado (27/08/2005 00:00:00) el huracán es categoría 2 y la boya se ubica en la parte frontal derecha del huracán (cuadrante II) a una distancia de 690 kilómetros. El RMSE que se obtiene para este instante es cercano a cero para las simulaciones con y sin corrientes, esto se debe a que el oleaje presenta baja energía, lo cual se observa en la magnitud de la energía en el espectro de frecuencias para esta fecha (ver figura 5-2). A medida que el huracán avanza, incrementando de categoría y disminuyen la distancia con respecto a la boya (27/08/2005 18:00:00 hasta 28/08/2005 18:00:00), aumenta el valor del error cuadrático medio. En este instante (28/08/2005 18:00:00), el huracán presenta categoría 5 y se encuentra más cerca la ubicación de la boya, la cual boya está ubicada en la parte frontal izquierda (cuadrante I) del huracán, presentando el máximo valor del RMSE ($12.9 [m^2/degH_z]$). A partir de este instante (29/08/2005 00:00:00) la categoría del huracán empieza a descender y la boya se ubica en la parte trasera izquierda (cuadrante IV) del huracán, disminuyendo el valor del error cuadrático medio para ambas simulaciones, en comparación con el espectro medido. Se observa que al incluir el efecto de las corrientes, considerando diferentes profundidades de integración, no presentan un cambio significativo en la estimación del error cuadrático medio (RMSE). Las máximas diferencias del RMSE, se presentan en la fecha (ver 28/08/2005 00:00:00), considerando la profundidad de integración de 45 metros, obteniendo una disminución del RMSE que va hasta 6 %, en comparación con los resultados obtenidos con las corrientes superficiales. En los demás instantes de tiempo analizados, se observa que hay una mejor estimación al considerar las corrientes superficiales, en comparación con los resultados obtenidos considerando el efecto de las corrientes en las diferentes profundidades. Con respecto a la boya 42040, en el primer instante (21/09/2005 18:00:00) el huracán es categoría 5 y se encuentra a una distancia de 534 kilómetros de la boya, la cual se ubica en el cuadrante frontal derecho (cuadrante II). En este instante se presentan valores del RMSE cercanos a cero. A medida que el huracán avanza en la máxima categoría (22/09/2005 00:00:00 hasta 22/09/2005 12:00:00), reduciendo la distancia respecto a la boya, la cual se ubica en el cuadrante trasero derecho (cuadrante III), se presenta un incremento de la magnitud del RMSE. En el instante (23/09/2005 00:00:00) el huracán es categoría 4 y se encuentra más cerca de la boya, a una distancia de 403 kilómetros, presentando el valor máximo de RMSE ($8.1 [m^2/degH_z]$). A partir de este instante el huracán disminuye de categoría (23/09/2005 00:00:00 - 24/09/2005 12:00:00). Se observa que el efecto de las corrientes no produce un cambio significativo en la estimación del RMSE, presentando diferencias porcentuales que van hasta 4 %, sin embargo, se presenta una mejor estimación del espectro direccional de energía en la mayoría de los instantes analizados, teniendo en cuenta los perfiles de velocidad de las bases de datos de GLORYS.

En general, al tener en cuenta el efecto del campo de corrientes ponderado, considerando diferentes profundidades de integración en los perfiles de velocidad de GLORYS, no se presenta un cambio significativo en el comportamiento de las series temporales de los parámetros escalares de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico (T_p), y en la distribución de la energía en el espectro escalar de frecuencias y en el espectro direccional de energía. El campo de corrientes ponderado presenta errores porcentuales en la estimación de la magnitud de la velocidad de corrientes que oscilan entre -40 % y 40 % presentando valores picos que alcanzan errores porcentuales de 100 %. En los diferentes instantes de tiempo analizados, y en comparación con las boyas de la NOAA, hay una

disminución del error cuadrático medio de hasta 2% de los parámetros escalares del oleaje. En el caso del espectro escalar de frecuencias se obtuvo una disminución del error cuadrático medio, presentando una disminución de los errores porcentuales que van hasta 13 %, durante el paso del huracán Katrina, y 6,5 % durante el paso del huracán Rita. En el caso del espectro direccional de energía, se presentan errores porcentuales del error cuadrático medio que van hasta 6 %, durante el paso del huracán Katrina, y 4 % en el caso del huracán Rita. Esto indica, que a pesar de obtener una mejor estimación de los parámetros escalares y espectros de energía, en comparación con las mediciones de las boyas de la NOAA, no se presentan variaciones significativas al tener en cuenta el perfil de corrientes ponderado en la modelación espectral del oleaje.

7. Conclusiones y recomendaciones

Al incluir el efecto de la interacción ola-corriente en la estimación de los parámetros escalares y los espectros de energía, se demuestra una mayor precisión en todos los cálculos del modelo computacional de oleaje (WWIII) en condiciones extremas de viento de huracán. Esto se concluye a partir de comparar los resultados de las simulaciones con y sin interacción ola-corriente con la información disponible de las boyas de la NOAA en el Golfo de México para los casos de los huracanes Katrina y Rita de 2005. La ganancia en precisión al aumentar la complejidad del modelo trae como consecuencia un gasto computacional más alto. Al considerar las corrientes, las simulaciones tardan alrededor de un 25 % más – 15 horas, en vez de 12 que tarda el modelo sin corrientes – usando un clúster de 1 nodo \times 16 procesadores en la Universidad Nacional sede Medellín.

En particular, los parámetros escalares del oleaje, altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p) calculados a partir del modelo propuesto en esta tesis se ajustan con alta precisión a los datos disponibles. Por otro lado, en el caso de los espectros direccionales de energía, el modelo se aproxima con menos exactitud al comportamiento del espectro medido. Sin embargo, presenta un mejor poder predictivo que los modelos sin interacción ola-corriente. Este efecto se debe a que el modelo no representa adecuadamente los valores máximos y la distribución de la energía en frecuencias y direcciones para todos los instantes. Además, los espectros que se obtienen a partir de las simulaciones numéricas tienen un comportamiento redondeado o suavizado como consecuencia de los esquemas numéricos empleados en la solución de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de las olas, razón por la cual se presentan discrepancias con el espectro medido por la boya. Es importante tener en cuenta que las mediciones realizadas por las boyas de la NOAA presentan dificultades durante condiciones extremas de huracán y que el comportamiento que se obtiene del espectro direccional es una aproximación de los métodos empleados por la NOAA para calcular el espectro a partir de las mediciones (Montoya et al., 2013). Todos estos efectos pueden generar mayores diferencias al comparar el espectro modelado con y sin corrientes, y el espectro medido por la boya; contrarrestarlos y llegar a modelos más precisos es motivación para futuras investigaciones. Por su parte, los resultados de esta tesis permiten avanzar hacia modelos computacionales más precisos que ayuden en el diseño de estructuras marinas que resistan condiciones extremas y en la prevención de desastres a causa de huracanes.

7.1. Conclusiones por objetivo

Objetivo 1: Definir una metodología de calibración y validación de un modelo espectral de oleaje para condiciones extremas de huracán e interacción ola - corriente.

- La metodología propuesta por Montoya (2013) fue empleada para calibrar el modelo de oleaje WWIII en condiciones extremas de viento de huracán, incluyendo la interacción ola-corriente. Los resultados obtenidos en la Sección 4.1 representan adecuadamente el comportamiento temporal y espacial de los parámetros escalares y espectros de energía del oleaje. Esto se concluye a partir de comparar los resultados computacionales con respecto a la información disponible de las boyas de la NOAA, los cuáles concuerdan con una alta precisión (errores cuadráticos medios bajos). La validez del método se demostró definiendo las resoluciones espacial, espectral y temporal del modelo y determinando el coeficiente de calibración (C_o) óptimo para la modelación espectral de los huracanes Katrina y Rita.

Objetivo 2: Analizar el efecto de la modelación numérica de las interacciones ola - corriente en la transformación de la energía espectral del oleaje bajo condiciones de huracán.

- El efecto de la interacción ola-corriente en la modelación espectral del oleaje presenta una mejor estimación de los parámetros escalares del oleaje durante condiciones extremas de viento de huracán. En la sección 4.2 se demostró que el RMSE de las series temporales de altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico del oleaje (θ_p) disminuyen cuando se usa el modelo con interacción ola-corriente y se compara con las mediciones de las boyas 42001, 42002, 42036, 42038, 42039 y 42040 de la NOAA. Reducciones del RMSE entre el 3 % y el 20 % para los huracanes Katrina y Rita comprueban el aumento en la precisión usando el método. Adicionalmente, se encontró que la interacción ola-corriente tiene un mayor efecto en la magnitud de la altura de ola en condiciones extremas de viento de huracán en comparación con los resultados obtenidos en condiciones débiles de viento, sin embargo, presentan mayores diferencias porcentuales durante condiciones débiles de viento.
- En la sección 4.2, se observó una correlación entre el asomeramiento de la ola cuando $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ y la disminución de la altura de ola significativa (H_s) para $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ y $270^\circ < \alpha < 360^\circ$. Este comportamiento se encontró en ambos huracanes coincidiendo en el 65 % – 89 % de la serie de tiempo medida por las diferentes boyas. Se debe también estudiar el efecto de la interacción ola-corriente en los términos de energía que corresponden a la interacción del oleaje con la atmósfera y las interacciones no lineales ola-ola, que pueden producir un efecto de asomeramiento/disminución de la altura de ola.
- La interacción ola-corriente produce zonas de asomeramiento y disminución de la altura de ola significativa (H_s), lo cual depende de la dirección del campo de corrientes y la dirección en la que se desplaza el oleaje. En la Sección 4.3, en condiciones débiles de viento ($< 5 \text{ ms}^{-1}$) y corrientes ($< 0,5 \text{ ms}^{-1}$), se presentaron diferencias en el patrón espacial de la altura de ola significativa (H_s) de 0,4 metros (12 %), las diferencias porcentuales oscilan entre –15 % y 15 %, lo que concuerda con el análisis espacial del efecto de la interacción ola-corriente en condiciones débiles de viento realizado por Montoya (2013). En condiciones extremas de

viento ($> 50 \text{ ms}^{-1}$) y corrientes ($> 1,2 \text{ ms}^{-1}$) se encontraron zonas donde el incremento de la altura de ola significativa (H_s) alcanza valores de 1,9 metros (40 %), las diferencias porcentuales oscilan entre -40% y 30% dependiendo de la ubicación relativa con respecto al huracán y a la dirección entre las corrientes y el oleaje.

- En la parte frontal del huracán (Cuadrante I y II) se presentaron diferencias de magnitud con errores porcentuales que oscilan entre -40% y 40% . En la parte trasera del huracán (Cuadrante III y IV) se presentaron variaciones de magnitud con errores porcentuales que oscilan entre -10% y 10% . Este efecto, estudiado en la Sección 4.3, se debe a la asimetría del campo de vientos del huracán que produce cambios en la dirección del oleaje y la magnitud de la energía en cada uno de los cuadrantes del huracán.
- El efecto de la interacción ola-corriente presenta una adecuada estimación del espectro escalar de frecuencias de energía ($E(f)$) durante condiciones extremas de viento de huracán. En la Sección 5.1 se obtuvo una disminución del error cuadrático medio (RMSE) del espectro escalar modelado cuando se considera el efecto de las corrientes superficiales y se compara con los datos de las boyas 42001 y 42038 para huracán Katrina, y las boyas 42002 y 42040 para el huracán Rita. En algunos instantes de tiempo se presenta una disminución del error cuadrático medio que representan incrementos en la precisión del cálculo de hasta el 40% para el huracán Katrina, y del 65% para el huracán Rita. Además, en la mayoría de los instantes de tiempo se presenta una mejor estimación de los parámetros del oleaje, los cuales se obtienen a partir del espectro escalar de frecuencias.
- Considerando el campo de corrientes superficiales de AVISO en la modelación espectral del oleaje, las principales variaciones de energía se presentan en las bajas frecuencias ($0,042 - 0,2 \text{ Hz}$). En este rango se concentra la mayor cantidad de energía durante los diferentes instantes de tiempo del huracán, y varía con diferencias porcentuales que oscilan entre -50% y 50% . Por otro lado, en el rango de frecuencias más altas ($> 0,2 \text{ Hz}$), las diferencias que se presentan oscilan entre -15% y 15% . El efecto del campo de corrientes, analizado en la Sección 5.1, presenta una mejor estimación de los valores máximos de energía en el espectro escalar de frecuencias en la mayoría de instantes durante el paso de los huracanes Katrina y Rita.
- Al considerar el campo de corrientes, se presentó una disminución del error cuadrático medio (RMSE) en la mayoría de instantes de tiempo analizados durante el paso de los huracanes Katrina y Rita, tomando como referencia los espectros medidos por las boyas 42001, 42036 y 42040 de la NOAA. En la Sección 5.2 se presentaron diferencias porcentuales del error cuadrático medio de la energía hasta del -30% , es decir, hubo un aumento significativo en la precisión para algunos instantes de tiempo. Para los demás instantes, las variaciones fueron más bajas o nulas, hubo mejoría o se obtuvo el mismo resultado que en el modelo sin interacción ola-corriente.
- En la sección 5.2, se observa que los cuadrantes II y III son los más energéticos, mientras que los cuadrantes I y IV presentan una menor magnitud de energía. Tomando el valor máximo de energía en el cuadrante II como referencia, se obtiene que los cuadrantes I, III y IV presentan aproximadamente el 30% , 50% y 4% del valor de la energía, respectivamente.

El espectro direccional que se obtiene en los cuadrantes I y IV presenta un comportamiento bimodal, donde los dos picos de máxima energía se concentran en dos direcciones diferentes. En los cuadrantes II y III, la energía se concentra alrededor de una dirección pico (θ_p). En particular, se encontró que el efecto de la interacción ola-corriente es más significativo en el comportamiento de los espectros escalares de energía en los cuadrantes I y IV, mientras en los cuadrante II y III, que corresponden a los cuadrantes más energéticos, la diferencia es menor.

- En los valores más altos de frecuencia (0,22 - 0,66 Hz), los términos fuente/sumidero que corresponden a la interacción atmósfera-oleaje y la interacción oleaje-océano presentaron errores porcentuales que oscilan entre -10% y 15% , y el término que corresponde a la interacción no lineal presentó oscilaciones entre -40% y 40% . Por su parte, en los valores que corresponden a las bajas frecuencias (0,042 - 0,22 Hz), los términos fuente y sumidero presentaron oscilaciones que varían entre -100% y 100% . Esto indica que el efecto de las corrientes superficiales en los términos fuente/sumidero es mayor para las frecuencias bajas. Las variaciones que se presentan en los términos fuente/sumidero se deben a la dirección relativa entre el oleaje y el viento y las variaciones del espectro direccional de energía al tener en cuenta el campo de corrientes superficiales.

Objetivo 3: Proponer una metodología que permita considerar el efecto del perfil de corrientes en el cálculo de los parámetros y espectros de energía del oleaje en un modelo de tercera generación.

- La metodología propuesta para tener en cuenta el efecto del perfil de velocidad en la modelación espectral mejora marginalmente la estimación de los parámetros y espectros de energía del oleaje. El campo de corrientes ponderado, usando esta metodología, presentó variaciones en el campo de velocidad que oscilan entre -40% y 40% , en comparación con las velocidades superficiales de las corrientes. A su vez, esta variación del campo de corrientes produjo una disminución del error cuadrático medio (RMSE) de tan solo 2% en la estimación de la altura de ola significativa (H_s) y del 1% en el periodo pico (T_p), durante el paso de los huracanes Katrina y Rita. En el caso del espectro escalar de frecuencias se presentaron diferencias porcentuales del RMSE que van hasta 13% durante el huracán Katrina y hasta $6,5\%$ para el huracán Rita. La estimación del espectro direccional de energía presenta errores porcentuales del RMSE del 6% y 4% durante el paso del huracán Katrina y Rita, respectivamente. Por lo tanto, en comparación con las mediciones de las boyas de la NOAA, incluir el perfil de velocidad del campo de corrientes no representa variaciones relevantes en la modelación espectral del oleaje.

7.2. Recomendaciones

A partir de la investigación presentada en esta tesis, se identifican futuras áreas de profundización que mejorarían la precisión de los modelos computacionales.

- Calibrar el modelo de oleaje (WWIII) a partir del espectro direccional de energía. Esto debido a que la calibración del modelo a partir de parámetros escalares, en este caso la altura de ola significativa (H_s) y el periodo pico (T_p), no representa de manera adecuada la física del oleaje, ya que no permiten entender las variaciones de la energía en el espacio espectral de frecuencias y direcciones.
- Realizar los cálculos de interacción ola-corriente considerando datos de corrientes superficiales con una mejor resolución espacial y temporal, para representar con mayor precisión las variaciones locales durante condiciones extremas de viento de huracán.
- Analizar los efectos de la interacción ola-corriente acoplando modelos regionales de oleaje y corrientes, lo que permite el intercambio de variables entre los modelos. Además, realizar simulaciones con modelos operacionales que permiten el intercambio de información en tiempo real.

A. Anexo: Interacción no lineal ola-ola

S_{nl}

Las interacciones no lineales producidas por la interacción ola-ola, presentan una redistribución de la energía en el espectro, esto debido a un mecanismo de resonancia. En aguas profundas, la evolución del espectro de energía es dominado por la interacción de cuatro olas llamada cuadrupleta de olas. La energía se puede transferir a frecuencias altas o bajas, produciendo de esta forma disminución de la frecuencia pico o disipación de la energía por whitecapping, respectivamente. En aguas profundas, las interacciones no lineales producidas por la interacción entre las olas, se calcula utilizando la aproximación de interacción discreta (DIA) (Hasselmann et al., 1973).

Las interacciones no lineales resonantes ocurren entre cuatro componentes de ola (cuádruples) con el vector de número de ola k_1 a k_4 . En el DIA, se supone que $k_1 = k_2$. Las condiciones de resonancia requieren que

$$\begin{cases} k_1 + k_2 = k_3 + k_4 \\ \sigma_2 = \sigma_1 \\ \sigma_3 = (1 + \lambda_{nl})\sigma_1 \\ \sigma_4 = (1 - \lambda_{nl})\sigma_1 \end{cases} \quad (\text{A-1})$$

Donde λ_{nl} es una constante. Para las cuadrupletas, la contribución δS_{nl} a la interacción para cada combinación discreta (f_r, θ) del espectro correspondiente a k_1 se calcula como

$$\begin{pmatrix} \delta S_{nl,1} \\ \delta S_{nl,3} \\ \delta S_{nl,4} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} C g^{-4} f_{r,1}^{11} \left[E_1^2 \left(\frac{E_3}{(1 + \lambda_{nl})^4} + \frac{E_4}{(1 - \lambda_{nl})^4} \right) - 2 \frac{E_1 E_3 E_4}{(1 - \lambda_{nl}^2)^4} \right] \quad (\text{A-2})$$

Donde

$$\begin{cases} E_1 = E(f_{r1}, \theta_1) & \delta S_{nl,1} = \delta S_{nl}(f_{r,1}, \theta_1) \\ E_2 = E(f_{r2}, \theta_2) & \delta S_{nl,2} = \delta S_{nl}(f_{r,2}, \theta_2) \\ E_3 = E(f_{r3}, \theta_3) & \delta S_{nl,3} = \delta S_{nl}(f_{r,3}, \theta_3) \end{cases} \quad (\text{A-3})$$

Las interacciones no lineales son calculados considerando un número limitado de combinaciones (λ_{nl}, C) , donde C es la constante de proporcionalidad. En la practica, solo una combinación es usada. La Tabla **A-1** presenta los valores predeterminados de las constantes C y λ_{nl} en la aproximación de interacción discreta DIA.

Tabla A-1.: Constates predeterminadas en la DIA para los paquetes de entrada de disipación.

	λ_{nl}	C
ST6	0.25	3.00x10 ⁷
WAM-3	0.25	2.78x10 ⁷
ST4	0.25	2.50x10 ⁷
Tolman and Chalikov	0.25	1.00x10 ⁷

El término de interacciones no lineales S_{nl} es desarrollado para aguas profundas, usando la apropiada relación de dispersión en las condiciones de resonancia. Cuando se considera aguas someras la expresión es escalada por el factor D .

$$D = 1 + \frac{c_1}{\bar{k}d} [1 - c_2 \bar{k}d] e^{-c_3 \bar{k}d} \quad (\text{A-4})$$

Los valores recomendados para las constantes son $c_1 = 5,5$, $c_2 = 5/6$ $c_3 = 1,25$ propuesto por (Hasselmann et al., 1973). Donde el término \bar{k} está dado por la siguiente expresión:

$$\bar{k} = E^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty k F(f_r, \theta) \cdot df_r \cdot d\theta \quad (\text{A-5})$$

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(f_r, \theta) df_r d\theta \quad (\text{A-6})$$

Por razones numéricas, la profundidad relativa media es estimada como:

$$\bar{k}d = 0,75 \hat{k}d \quad (\text{A-7})$$

$$\hat{k} = \left(1/\sqrt{k}\right)^{-2} \quad (\text{A-8})$$

En aguas someras, la corrección con el factor D es valido para profundidades intermedias, por esta razón, no se permite que la profundidad relativa media $\bar{k}d$ sea menor a 0,5.

B. Anexo: Interacción atmósfera-oleaje y oceáno-oleaje $S_{in} + S_{ds}$

El término fuente que representa el suministro de energía debido al viento es calculado con la formulación de Tolman & Chalikov (1996), la cual consiste en los términos de entrada propuestos por Chalikov & Belevich (1993) y Chalikov (1995), y dos componentes de disipación. El término fuente que representa el ingreso de la energía por el viento está dado por la siguiente expresión

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma \beta N(k, \theta), \quad (\text{B-1})$$

Donde β es el parámetro adimensional de la interacción viento-ola, la cual es aproximada como

$$10^4 \beta = \begin{cases} -a_1 \sigma_a^2 - a_2 & , \quad \sigma_a < -1 \\ a_3 \sigma_a (a_4 \sigma_a - a_5) - a_6 & , \quad -1 \leq \sigma_a < \Omega_1/2 \\ (a_4 \sigma_a - a_5) \sigma_a & , \quad \Omega_1/2 \leq \sigma_a < \Omega_1 \\ a_7 \sigma_a - a_8 & , \quad \Omega_1 \leq \sigma_a < \Omega_2 \\ a_9 (\sigma_a - 1)^2 + a_{10} & , \quad \Omega_2 \leq \sigma_a \end{cases} \quad (\text{B-2})$$

Donde,

$$\sigma_a = \frac{\sigma u_\lambda}{g} \cos(\theta - \theta_w) \quad (\text{B-3})$$

es la frecuencia no dimensional de un componente espectral, θ_w es la dirección del viento y u_λ es la velocidad del viento a una altura igual a la longitud de ola "aparente"

$$\lambda_a = \frac{2\pi}{k |\cos(\theta - \theta_w)|}. \quad (\text{B-4})$$

Los parámetros a_1 hasta a_{10} y Ω_1 , Ω_2 dependen del coeficiente de arrastre C_λ a la altura $z = \lambda_a$

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 1,075 + 75C_\lambda & \Omega_2 &= 1,2 + 300C_\lambda \\ a_1 &= 0,25 + 395C_\lambda, & a_3 &= (a_0 - a_2 - a_1)/(a_0 + a_4 + a_5) \\ a_2 &= 0,35 + 150C_\lambda, & a_5 &= a_{41} \\ a_4 &= 0,30 + 300C_\lambda, & a_6 &= a_0(1 - a_3) \\ a_9 &= 0,35 + 240C_\lambda, & a_7 &= (a_9(\Omega_2 - 1)^2 + a_{10})/(\Omega_2 - \Omega_1) \\ a_{10} &= -0,05 + 470C_\lambda, & a_8 &= a_7\Omega_1 \\ & & a_0 &= 0,25a_5^2/a_4 \end{aligned} \quad (\text{B-5})$$

El modelo de oleaje toma el viento u_r a una altura de referencia dada z_r como su entrada, de modo que u_λ y C_λ deben derivarse como parte de la parametrización. Excluyendo una capa superficial delgada que se ajusta a la superficie del agua, el perfil medio del viento está cerca de logarítmico

$$u_z = \frac{v_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) , \quad (\text{B-6})$$

donde $\kappa = 0,4$ es la constante Von Karman, y z_0 es el parámetro de rugosidad. Esta ecuación puede reescribirse en términos del coeficiente de arrastre C_r a la altura de referencia z_r como (Chalikov, 1995).

$$C_r = \kappa^2 [R - \ln(C)]^2 , \quad (\text{B-7})$$

donde

$$R = \ln \left(\frac{z_r g}{\chi \sqrt{\alpha} u_r^2} \right) , \quad (\text{B-8})$$

donde $\chi = 0,2$ es una constante, y donde α es el nivel de energía no dimensional convencional a altas frecuencias. Una aproximación explícita precisa a estas relaciones implícitas se da como

$$C_r = 10^{-3} \left(0,021 + \frac{10,4}{R^{1,23} + 1,85} \right) . \quad (\text{B-9})$$

Por lo tanto, la estimación del coeficiente de arrastre requiere una estimación del nivel de energía de alta frecuencia α , que podría estimarse directamente a partir del modelo de oleaje. Sin embargo, la parte correspondiente del espectro generalmente no está bien resuelta, tiende a ser ruidosa y está contaminada por errores en varios términos fuente. Por lo tanto, α se estima paramétricamente como (Jensen et al., 2017).

$$\alpha = 0,57 \left(\frac{u_*}{c_p} \right)^{3/2} . \quad (\text{B-10})$$

Como la última ecuación depende del coeficiente de arrastre, las ecuaciones B-5 a B-7 formalmente necesitan ser resueltos iterativamente. Dichas iteraciones se realizan durante la inicialización del modelo, pero no son necesarias durante la ejecución del modelo real, ya que u_* generalmente cambia lentamente. En Tolman & Chalikov (1996), C_r se expresa por lo tanto directamente en términos de c_p . Usando la definición del coeficiente de arrastre y la ecuación B-8 el parámetro de rugosidad z_0 se convierte en

$$z_0 = z_r \exp \left(-\kappa C_r^{-1/2} \right) , \quad (\text{B-11})$$

Y la velocidad del viento y el coeficiente de dragado a una altura λ se convierte en

$$u_\lambda = u_r \frac{\ln(\lambda_a/z_0)}{\ln(z_r/z_0)}, \quad (\text{B-12})$$

$$C_\lambda = C_r \left(\frac{u_a}{u_\lambda} \right)^2, \quad (\text{B-13})$$

Finalmente, la ecuación B-7 requiere una estimación de la frecuencia pico f_p . Para obtener una estimación constante de la frecuencia pico de olas generadas activamente, incluso en espectros multimodales complejos, esta frecuencia se estima a partir de la frecuencia pico equivalente de la parte positiva del término fuente de entrada (Tolman & Chalikov, 1996).

$$f_{p,i} = \frac{\int \int f^{-2} c_g^{-1} \max[0, \text{wind}(k, \theta)] df d\theta}{\int \int f^{-3} c_g^{-1} \max[0, \text{wind}(k, \theta)] df d\theta}, \quad (\text{B-14})$$

donde la frecuencia pico se estima como

$$\tilde{f}_p = 3,6 \cdot 10^{-4} + 0,92 \tilde{f}_{p,i} - 6,3 \cdot 10^{-10} \tilde{f}_{p,i}^{-3}. \quad (\text{B-15})$$

Todas las constantes en las ecuaciones anteriores son definidas dentro del modelo, se define la altura del viento de referencia z_r .

Durante la prueba de una implementación global de WAVEWATCH III que incluye este término fuente (Tolman, 2002b), se descubrió que su disipación de oleaje debido a vientos opuestos o débiles se sobreestimó severamente. Para corregir esta deficiencia, un término fuente de entrada filtrada se define como

$$S_{i,m} = \begin{cases} X_{si} & \text{for } \beta \geq 0 \quad \text{or} \quad f > 0,8f_p \\ X_{si} & \text{for } \beta < 0 \quad \text{and} \quad f < 0,6f_p \\ \mathcal{X}_{si} & \text{for } \beta < 0 \quad \text{and} \quad 0,6f_p < f < 0,8f_p \end{cases}, \quad (\text{B-16})$$

donde f es la frecuencia, f_p es la frecuencia máxima del oleaje tipo sea calculada a partir del término de la fuente de entrada, S_i es el término de la fuente de entrada y $0 < X_s < 1$ es un factor de reducción para S_i , que se aplica a oleaje tipo swell con β negativo solamente (el cual es definido). X_s representa una reducción lineal de X_s con f_p que proporciona una transición suave entre la entrada original y la reducida. El coeficiente de arrastre que se deriva de la ecuación B-7 incrementa mucho para las velocidades del viento con fuerza de huracán, lo que lleva a tasas de crecimiento de olas poco realistas. Para aliviar esto, el coeficiente de arrastre a la altura de referencia C_r se puede limitar con un coeficiente de arrastre máximo permitido $C_{r,max}$.

$$C_r = \min(C_r, C_{r,max}) \quad , \quad (\text{B-17})$$

O con una transición suave

$$C_r = C_{r,max} \tanh(C_r/C_{r,max}) \quad . \quad (B-18)$$

La selección del coeficiente de arrastre limitado ocurre en la etapa de compilación del código. El usuario puede establecer el nivel y el tipo de límite. configuración predeterminada son $C_{r,max} = 2,5 \times 10^{-3}$ y B-17 El término de fuente de disipación correspondiente consta de dos componentes. El constituyente de baja frecuencia (dominante) se basa en una analogía con la disipación de energía debido a la turbulencia,

$$S_{ds,l}(k, \theta) = -2 u_* h k^2 \phi N(k, \theta) , \quad (B-19)$$

$$h = 4 \left(\int_0^{2\pi} \int_{f_h}^{\infty} F(f, \theta) df d\theta \right)^{1/2} . \quad (B-20)$$

$$\phi = b_0 + b_1 \tilde{f}_{p,i} + b_2 \tilde{f}_{p,i}^{-b_3} . \quad (B-21)$$

donde h es una escala de mezcla determinada a partir del contenido de energía de alta frecuencia del campo de ola y donde ϕ es una función empírica que explica la etapa de desarrollo del campo de ola. La parte lineal de la ecuación B-21 describe la disipación para las olas crecientes. El término no lineal se ha agregado para permitir cierto control sobre las condiciones de crecimiento completo definiendo un valor mínimo para ϕ (ϕ_{min}) para un valor mínimo de $f_{p,i}$ ($f_{p,i,min}$). Si ϕ_{min} está debajo del lineal curva, b_2 y b_3 se dan como

$$b_2 = \tilde{f}_{p,i,min}^{b_3} \left(\phi_{min} - b_0 - b_1 \tilde{f}_{p,i,min} \right) , \quad (B-22)$$

$$b_3 = 8 . \quad (B-23)$$

Si ϕ_{min} está por encima de la curva lineal, b_2 y b_3 se dan como

$$\tilde{f}_a = \frac{\phi_{min} - b_0}{b_1} , \quad \tilde{f}_b = \max \left\{ \tilde{f}_a - 0,0025 , \tilde{f}_{p,i,min} \right\} , \quad (B-24)$$

$$b_2 = \tilde{f}_b^{b_3} \left[\phi_{min} - b_0 - b_1 \tilde{f}_b \right] , \quad (B-25)$$

$$b_3 = \frac{b_1 \tilde{f}_b}{\phi_{min} - b_0 - b_1 \tilde{f}_b} . \quad (B-26)$$

La estimación anterior de b_3 da como resultado $\partial\phi/\partial\tilde{f}_{p,i} = 0$ para $\tilde{f}_{p,i} = \tilde{f}_b$. Para $\tilde{f}_{p,i} < \tilde{f}_b$, ϕ se mantiene constante ($\phi = \phi_{\min}$). La disipación empírica de alta frecuencia se define como

$$S_{ds,h}(k, \theta) = -a_0 \left(\frac{u_*}{g} \right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k, \theta) , \quad (\text{B-27})$$

$$B = a_1 \left(\frac{f u_*}{g} \right)^{-a_2} , \quad (\text{B-28})$$

$$\alpha_n = \frac{\sigma^6}{c_g g^2 \alpha_r} \int_0^{2\pi} N(k, \theta) d\theta , \quad (\text{B-29})$$

donde α_n es el nivel de energía de alta frecuencia no dimensional de Phillips normalizado con α_r , y donde a_0 hasta a_2 y α_r son constantes empíricas. Esta parametrización implica que $m = 5$ en la cola paramétrica, que ha sido preestablecida en el modelo. Tenga en cuenta que en el modelo Ecuación B-27 se resuelve asumiendo una relación de dispersión de agua profunda, en cuyo caso α_n se evalúa como

$$\alpha_n = \frac{2 k^3}{\alpha_r} F(k) . \quad (\text{B-30})$$

Los dos componentes del término fuente de disipación se combinan usando una combinación lineal simple, definida por las frecuencias f_1 y f_2 .

$$S_{ds}(k, \theta) = \mathcal{A} S_{ds,l} + (1 - \mathcal{A}) S_{ds,h} , \quad (\text{B-31})$$

$$\mathcal{A} = \begin{cases} 1 & \text{for } f < f_l , \\ \frac{f-f_2}{f_1-f_2} & \text{for } f_1 \leq f < f_2 , \\ 0 & \text{for } f_2 \leq f . \end{cases} \quad (\text{B-32})$$

Para mejorar la suavidad del comportamiento del modelo para frecuencias cercanas al corte paramétrico f_{hf} , se utiliza una zona de transición similar entre el espectro pronóstico y la cola de alta frecuencia paramétrica

$$N(k_i, \theta) = (1 - \mathcal{B}) N(k_i, \theta) + \mathcal{B} N(k_{i-1}, \theta) \left(\frac{f_i}{f_{i-1}} \right)^{-m-2} , \quad (\text{B-33})$$

donde i es un contador discreto del número de ola, y B se define de manera similar a A , que varía de 0 a 1 entre f_2 y f_{hf} . Las frecuencias que definen las transiciones y la escala de longitud h están predefinidas en el modelo como

$$\left. \begin{aligned} f_{hf} &= 3,00 f_{p,i} \\ f_1 &= 1,75 f_{p,i} \\ f_2 &= 2,50 f_{p,i} \\ f_h &= 2,00 f_{p,i} \end{aligned} \right\} . \quad (\text{B-34})$$

Tabla B-1.: Constantes sugeridas en el paquete de términos fuente de Tolman y Chalikov KC denota Kahma y Calkoen (1992, 1994). La primera línea representa la configuración predeterminada del modelo.

Tuned to :	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	ϕ_{\min}
KC estable	4.8	$1,7 \cdot 10^{-4}$	2.0	$0,3 \cdot 10^{-3}$	0.47	0.003
KC inestable	4.5	$2,3 \cdot 10^{-3}$	1.5	$-5,8 \cdot 10^{-3}$	0.60	0.003

Además, $f_{p,i,min} = 0,009$ y $\alpha_r = 0,002$ están preestablecidos en el modelo. Todos los demás parámetros ajustables deben ser proporcionados por el usuario. Los valores sugeridos y predeterminados se dan en la Tabla **B-1**. Los resultados de la prueba de estos términos fuente en una implementación de modelo global (Tolman, 2002b) sugirieron que (i) el modelo se ajustó de la manera clásica para el Fetch limitado, al buscar condiciones estables subestima el crecimiento de las olas del océano profundo (una deficiencia aparentemente compartida por el modelo WAM) y que (ii) los efectos de la estabilidad en la tasa de crecimiento de las olas (Kahma y Calkoen, 1992, 1994) deberían incluirse explícitamente en la parametrización de los términos fuente. Idealmente, ambos problemas se resolverían mediante una investigación teórica de los términos fuente. Alternativamente, la velocidad del viento u puede ser reemplazada por una velocidad del viento efectiva u_e . En Tolman (2002b) se utiliza la siguiente velocidad efectiva del viento:

$$\frac{u_e}{u} = \left(\frac{c_o}{1 + C_1 + C_2} \right)^{1/2}, \quad (\text{B-35})$$

$$C_1 = c_1 \tanh [\max(0, f_1 \{ST - ST_o\})], \quad (\text{B-36})$$

$$C_2 = c_2 \tanh [\max(0, f_2 \{ST - ST_o\})], \quad (\text{B-37})$$

$$ST = \frac{hg}{u_h^2} \frac{T_a - T_s}{T_0}, \quad (\text{B-38})$$

donde ST es un parámetro de estabilidad a granel, y T_a , T_s y T_0 son la temperatura del aire, del mar y de referencia, respectivamente. Además, f_1 , c_1 y c_2 tienen signos opuestos y $f_2 = f_1 c_1 / c_2$. Siguiendo a Tolman (2002b), la configuración predeterminada de $c_0 = 1,4$, $c_1 = 0,1$, $c_2 = 0,1$, $f_1 = 150$ y $ST_0 = 0,01$ en combinación con la sintonización de datos de crecimiento de la ola de estratificación estable (valores del parámetro 'KC estable' en la tabla 2.3 Tabla **B-1** se utilizan. La velocidad del viento efectiva se obtuvo para vientos a 10m de altura. El usuario puede desactivar la corrección del viento durante la compilación del modelo, y el usuario puede redefinir la configuración predeterminada de los parámetros en los archivos de entrada del programa.

C. Anexo: Principales parámetros en la configuración y calibración del modelo de oleaje WWIII

Tabla C-1.: Principales parámetros empleados en la calibración y configuración del modelo de oleaje WWIII.

Tema	Descripción	Observación
Zona de estudio Rango Longitud Rango Latitud	Golfo de México 98°W - 76°W 18°N - 31°N	Se consideró como zona de estudio el Golfo de México debido a la información disponible de las boyas de la NOAA.
Periodo de simulación Katrina Rita	01/08/2005 00:00 hasta 15/09/2005 00:00 01/09/2005 00:00 hasta 15/10/2005 00:00	Los periodos de simulación tienen en cuenta condiciones de viento débiles antes y después del periodo de huracán.
Configuración numérica Resolución espacial Resolución espectral Resolución direccional	1/6° (18,5 kilómetros) 30 Frecuencias (0,042 Hz - 0,65 Hz) 72 direcciones (0° - 360°)	Análisis de sensibilidad de la solución espacial de la altura de ola significativa. Se tiene en cuenta el efecto Garden Sprinkler (Booij & Holthuijsen, 1987).
Pasos de tiempo Global Propagación espacial Propagación espectral Términos Fuente	240 segundos 60 segundos 25 segundos 3 segundos	Los pasos de tiempo son estimados teniendo en cuenta las formulaciones de Spindker & Tolman (2007), y el análisis realizado por Montoya (2013).
Condiciones iniciales	Espectro local JONSWAP	Velocidad del viento, dirección, fetch y rango de frecuencias.
Condiciones de frontera	Sin condiciones de frontera	Forzador campos de vientos HURNARR.
Esquema de propagación	Esquema de propagación de tercer orden (UQ) (Diferencias Finitas) Esquema de orden superior con la técnica de promediado (PR3)	Efecto Garden Sprinkler (Tolman, 2002b)
Forzadores Vientos Corrientes Variación del nivel	Vientos de huracán (HURNARR) Corrientes superficiales de AVISO Perfiles de Corrientes de GLORYS No se considera	El campo de vientos de huracán se obtuvo con la metodología de vientos combinados HURNARR.
Coeficiente de arrastre	Limitado	Cd Máximo
Parámetros físicos	Valores por defecto y optimización del coeficiente de calibración STABSH (Co)	Valores por defecto de los demás parámetros físicos.
Términos fuente y sumidero Interacción atmósfera-oleaje Interacción oleaje-océano interacción no lineales interacción por fondo Entrada lineal	Paquete de términos fuente (ST2) Paquete de términos fuente (ST2) Aproximación de interacción discreta (DIA) Formulación de fricción por fondo (BT1) Parametrización con filtro (LN1)	(Tolman & Chalikov, 1996) (Tolman & Chalikov, 1996) (Hasselmann et al., 1985) (Hasselmann et al., 1973) (Cavaleri & Rizzoli, 1981)

Bibliografía

- Abdolali, A., Roland, A., Van Der Westhuysen, A., Meixner, J., Chawla, A., Hesser, T. J., Smith, J. M., & Sikiric, M. D. (2020). Large-scale hurricane modeling using domain decomposition parallelization and implicit scheme implemented in wavewatch iii wave model. *Coastal Engineering*, 157, 103656.
- Adamo, F., De Capua, C., Filianoti, P., Lanzolla, A. M. L., & Morello, R. (2014). A coastal erosion model to predict shoreline changes. *Measurement*, 47, 734–740.
- Adams, P. N., Conlin, M. P., Johnson, H. A., Paniagua-Arroyave, J. F., Woo, H. B., & Kelly, B. (2017). Hurricane irma’s effects on dune and beach morphology at matanzas inlet, atlantic coast of north florida: Impacts and inhibited recovery? *AGUFM*, 2017, U32B–04.
- Altomare, C., Suzuki, T., & Verwaest, T. (2020). Influence of directional spreading on wave overtopping of sea dikes with gentle and shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 157, 103654.
- Barber, N. F. & Ursell, F. (1948). The generation and propagation of ocean waves and swell. i. wave periods and velocities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 240(824), 527–560.
- Benetazzo, A., Carniel, S., Sclavo, M., & Bergamasco, A. (2013). Wave–current interaction: Effect on the wave field in a semi-enclosed basin. *Ocean Modelling*, 70, 152–165.
- Bennett, V. C. & Mulligan, R. P. (2017). Evaluation of surface wind fields for prediction of directional ocean wave spectra during hurricane sandy. *Coastal Engineering*, 125, 1–15.
- Bennett, V. C., Mulligan, R. P., & Hapke, C. J. (2018). A numerical model investigation of the impacts of hurricane sandy on water level variability in great south bay, new york. *Continental Shelf Research*, 161, 1–11.
- Booij, N. & Holthuijsen, L. H. (1987). Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models. *Journal of Computational Physics*, 68(2), 307–326.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666.
- Bouws, E. & Komen, G. (1983). On the balance between growth and dissipation in an extreme depth-limited wind-sea in the southern north sea. *Journal of Physical Oceanography*, 13(9), 1653–1658.

- Bretherton, F. P. & Garrett, C. J. R. (1968). Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 302(1471), 529–554.
- Cavaleri, L. & Rizzoli, P. M. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11), 10961–10973.
- Cavaleri, L. & Sclavo, M. (2006). The calibration of wind and wave model data in the mediterranean sea. *Coastal Engineering*, 53(7), 613–627.
- Chalikov, D. (1995). The parameterization of the wave boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, 25(6), 1333–1349.
- Chalikov, D. & Belevich, M. Y. (1993). One-dimensional theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 63(1-2), 65–96.
- Chelton, D. B. & Freilich, M. H. (2005). Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ecwrf and ncep numerical weather prediction models. *Monthly Weather Review*, 133(2), 409–429.
- Chen, S. S. & Curcic, M. (2016). Ocean surface waves in hurricane ike (2008) and superstorm sandy (2012): Coupled model predictions and observations. *Ocean Modelling*, 103, 161–176.
- Chen, S. S., Zhao, W., Donelan, M. A., & Tolman, H. L. (2013). Directional wind–wave coupling in fully coupled atmosphere–wave–ocean models: Results from cblast-hurricane. *Journal of the atmospheric sciences*, 70(10), 3198–3215.
- Choi, J., Lim, C. H., Lee, J. I., & Yoon, S. B. (2009). Evolution of waves and currents over a submerged laboratory shoal. *Coastal Engineering*, 56(3), 297–312.
- Collins, J. I., Viehman, M. J., et al. (1971). A simplified empirical model for hurricane wind fields. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Dietrich, J., Westerink, J., Kennedy, A., Smith, J., Jensen, R., Zijlema, M., Holthuijsen, L., Dawson, C., Luettich Jr, R., Powell, M., et al. (2011). Hurricane gustav (2008) waves and storm surge: hindcast, synoptic analysis, and validation in southern louisiana. *Monthly Weather Review*, 139(8), 2488–2522.
- Elshinnawy, A. I., Medina, R., & González, M. (2018). On the influence of wave directional spreading on the equilibrium planform of embayed beaches. *Coastal Engineering*, 133, 59–75.
- Group, T. W. (1988). The wam model—a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775–1810.
- Halverson, J. B. & Rabenhorst, T. (2013). Hurricane sandy: The science and impacts of a superstorm. *Weatherwise*, 66(2), 14–23.

-
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). *Ergänzungsheft 8-12*.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., & Barnett, T. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part ii: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11), 1378–1391.
- Hennon, C. C., Long, D. G., & Wentz, F. J. (2006). Validation of quikscat wind retrievals in tropical cyclone environments. In *Preprints, 14th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., JP1*, volume 1.
- Holland, G. J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly weather review*, 108(8), 1212–1218.
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- Hu, K. & Chen, Q. (2011). Directional spectra of hurricane-generated waves in the gulf of mexico. *Geophysical research letters*, 38(19).
- Huang, Y., Weisberg, R. H., Zheng, L., & Zijlema, M. (2013). Gulf of mexico hurricane wave simulations using swan: Bulk formula-based drag coefficient sensitivity for hurricane ike. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(8), 3916–3938.
- Jelesnianski, C. P. (1974). Splash:(special program to list amplitudes of surges from hurricanes). part two, general track and variant storm conditions.
- Jensen, R., Cialone, A., Smith, J., Bryant, M., & Hesser, T. (2017). Regional wave modeling and evaluation for the north atlantic coast comprehensive study. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(2), B4016001.
- Jonsson, I., Brink-Kjaer, O., & Thomas, G. (1978). Wave action and set-down for waves on a shear current. *Journal of Fluid Mechanics*, 87(3), 401–416.
- Jonsson, I. G., Skougaard, C., & Wang, J. D. (1970). Interaction between waves and currents. In *Coastal Engineering 1970* (pp. 489–507).
- Kirby, J. T. & Chen, T.-M. (1989). Surface waves on vertically sheared flows: approximate dispersion relations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C1), 1013–1027.
- Komen, G., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. M. 1994 dynamics and modelling of ocean waves. *Cambridge University Press, UK*, 554, 1271–1285.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. (1996). Dynamics and modelling of ocean waves. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves, by GJ Komen and L. Cavaleri and M. Donelan and K. Hasselmann and S. Hasselmann and PAEM Janssen, pp. 554. ISBN 0521577810. Cambridge, UK: Cambridge University Press, August 1996.*, 554.

- Krishnakumar, C., Sundar, V., & Sannasiraj, S. (2010). Pressures and forces due to directional waves on a vertical wall fronted by wave screens. *Applied Ocean Research*, 32(1), 1–10.
- Liang, B., Li, H., & Lee, D. (2007). Numerical study of three-dimensional suspended sediment transport in waves and currents. *Ocean Engineering*, 34(11-12), 1569–1583.
- Liang, B.-c., Li, H.-j., & Lee, D.-y. (2008). Bottom shear stress under wave-current interaction. *Journal of Hydrodynamics*, 20(1), 88–95.
- Liu, Z., Lin, Z., Tao, L., & Lan, J. (2016). Nonlinear wave-current interaction in water of finite depth. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 142(6), 04016009.
- Liu, Z., Wang, H., Zhang, Y. J., Magnusson, L., Loftis, J. D., & Forrest, D. (2020). Cross-scale modeling of storm surge, tide, and inundation in mid-atlantic bight and new york city during hurricane sandy, 2012. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 233, 106544.
- Lizano, O. G. & Omar, G. (1990). Un modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico de oleaje durante huracanes. *Revista Geofísica*, 33, 76–103.
- Longuet-Higgins, M. & Stewart, R. (1960). Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 8(4), 565–583.
- Longuet-Higgins, M. S. (1961). Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. *Ocean wave spectra*.
- Longuet-Higgins, M. S. & Stewart, R. (1961). The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 10(4), 529–549.
- Longuet-Higgins, M. S. & Stewart, R. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481–504.
- Longuet-Higgins, M. S. & Stewart, R. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep-Sea Res*, 11(4), 529–562.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., Jović, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E. H., et al. (2006). North american regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3), 343–360.
- Montoya, R. (2013). Study of the interactions between large scale climate phenomena and waves in the caribbean sea: methodologies to correct wind speed during average and hurricane conditions for wave climate analysis. phd thesis, univerisidad nacional de colombia.
- Montoya, R., Arias, A. O., Royero, J. O., & Ocampo-Torres, F. J. (2013). A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds. *Ocean Engineering*, 67, 100–118.
- Moon, I.-J., Ginis, I., Hara, T., Tolman, H. L., Wright, C., & Walsh, E. J. (2003). Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing. *Journal of physical oceanography*, 33(8), 1680–1706.

-
- Olabarrieta, M., Warner, J. C., Armstrong, B., Zambon, J. B., & He, R. (2012). Ocean–atmosphere dynamics during hurricane ida and nor’ida: An application of the coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (coawst) modeling system. *Ocean Modelling*, 43, 112–137.
- Ortiz-Royero, J. C. & Mercado-Irizarry, A. (2008). An intercomparison of swan and wavewatch iii models with data from ndbc-noaa buoys at oceanic scales. *Coastal engineering journal*, 50(01), 47–73.
- Peregrine, D. (1976). Interaction of water waves and currents. In *Advances in applied mechanics*, volume 16 (pp. 9–117). Elsevier.
- Petersen, Ø. W., Øiseth, O., & Lourens, E. (2019). Full-scale identification of the wave forces exerted on a floating bridge using inverse methods and directional wave spectrum estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 708–726.
- Phillips, O. & Banner, M. (1974). Wave breaking in the presence of wind drift and swell. *Journal of Fluid Mechanics*, 66(4), 625–640.
- Powell, M. D. & Houston, S. H. (1998). Surface wind fields of 1995 hurricanes erin, opal, luis, marilyn, and roxanne at landfall. *Monthly Weather Review*, 126(5), 1259–1273.
- Powell, M. D., Uhlhorn, E. W., & Kepert, J. D. (2009). Estimating maximum surface winds from hurricane reconnaissance measurements. *Weather and forecasting*, 24(3), 868–883.
- Powell, M. D., Vickery, P. J., & Reinhold, T. A. (2003). Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422(6929), 279–283.
- Romanok, K. M., Szabo, Z., Reilly, T. J., Defne, Z., & Ganju, N. K. (2016). Sediment chemistry and toxicity in barnegat bay, new jersey: pre-and post-hurricane sandy, 2012–13. *Marine pollution bulletin*, 107(2), 472–488.
- Ruti, P. M., Marullo, S., D’Ortenzio, F., & Tremant, M. (2008). Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the mediterranean basin: Analyses, quikscat and buoy data. *Journal of Marine Systems*, 70(1-2), 33–48.
- Sahoo, B., Jose, F., & Bhaskaran, P. K. (2019). Hydrodynamic response of bahamas archipelago to storm surge and hurricane generated waves—a case study for hurricane joaquin. *Ocean Engineering*, 184, 227–238.
- Samiksha, V., Vethamony, P., Antony, C., Bhaskaran, P., & Nair, B. (2017). Wave–current interaction during hudhud cyclone in the bay of bengal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(12), 2059.
- Sharma, N. & D’Sa, E. (2008). Assessment and analysis of quikscat vector wind products for the gulf of mexico: A long-term and hurricane analysis. *Sensors*, 8(3), 1927–1949.
- Sikirić, M. D., Roland, A., Janeković, I., Tomazić, I., & Kuzmić, M. (2013). Coupling of the regional ocean modeling system (roms) and wind wave model. *Ocean Modelling*, 72, 59–73.

- Skandali, D., Lourens, E., & Ogink, R. (2020). Calibration of response amplitude operators based on measurements of vessel motions and directional wave spectra. *Marine Structures*, 72, 102774.
- Spindler, D. M. & Tolman, H. (2007). Example of wave watch iii for the ne pacific. *Technical Note 259, US Department of Commerce, NOAA, NWS*.
- Stewart, R. H. & Joy, J. W. (1974). Hf radio measurements of surface currents. In *Deep sea research and oceanographic abstracts*, volume 21, (pp. 1039–1049). Elsevier.
- Swain, J., Umesh, P., Bhaskaran, P. K., & Balchand, A. (2019). Simulation of nearshore waves using boundary conditions from wam and wwiii—a case study. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1–15.
- Tamura, H., Waseda, T., & Miyazawa, Y. (2010). Impact of nonlinear energy transfer on the wave field in pacific hindcast experiments. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Tolman, H. (1990). The influence of unsteady depths and currents of tides on wind-wave propagation in shelf seas. *Journal of physical oceanography*, 20(8), 1166–1174.
- Tolman, H. (2002a). User manual and system documentation of wavewatch-iii version 2.22. *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 133 pp.+ Appendices*.
- Tolman, H. (2009). User manual and system documentation of wavewatch iii version 3.14. *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.+ Appendices*.
- Tolman, H. (2014). User manual and system documentation of wavewatch iii version 4.18. *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 316, 194 pp.+ Appendices*.
- Tolman, H. L. (1991). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21(6), 782–797.
- Tolman, H. L. (1992). Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of physical Oceanography*, 22(10), 1095–1111.
- Tolman, H. L. (2002b). Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, 4(3-4), 269–289.
- Tolman, H. L. & Chalikov, D. (1996). Source terms in a third-generation wind wave model. *Journal of Physical Oceanography*, 26(11), 2497–2518.
- Umesh, P., Bhaskaran, P. K., Sandhya, K., & Nair, T. B. (2019). Numerical simulation and preliminary analysis of spectral slope and tail characteristics using nested wam-swan in a shallow water application off visakhapatnam. *Ocean Engineering*, 173, 268–283.
- Visbal, J. & Ortiz, J. (2006). *Simulación de huracanes bajo el lenguaje Java a partir del modelo HURWIN (HURricane WINd model) para su aplicación sobre la costa Caribe Colombiana*. PhD thesis, Tesis de pregrado en Ingeniería de Sistemas]. Universidad Del Norte.

-
- Walsh, E., Wright, C., Vandemark, D., Krabill, W., Garcia, A., Houston, S., Murillo, S., Powell, M., Black, P., & Marks Jr, F. (2002). Hurricane directional wave spectrum spatial variation at landfall. *Journal of physical oceanography*, 32(6), 1667–1684.
- Whitham, G. (1965). A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a lagrangian. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2), 273–283.
- Whitham, G. (1974). *Linear and nonlinear waves* john wiley & sons. Inc., New York.
- Willoughby, H. & Rahn, M. (2004). Parametric representation of the primary hurricane vortex. part i: Observations and evaluation of the holland (1980) model. *Monthly Weather Review*, 132(12), 3033–3048.
- Wright, C. W., Walsh, E., Vandemark, D., Krabill, W., Garcia, A., Houston, S., Powell, M., Black, P., & Marks, F. (2001). Hurricane directional wave spectrum spatial variation in the open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 31(8), 2472–2488.
- WW3DG (2016). User manual and system documentation of wavewatch iii® version 5.16. *Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.*
- WW3DG (2019). User manual and system documentation of wavewatch iii® version 6.07. *Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.*
- Xie, L., Liu, H., & Peng, M. (2008). The effect of wave–current interactions on the storm surge and inundation in charleston harbor during hurricane hugo 1989. *Ocean modelling*, 20(3), 252–269.
- Xu, K., Mickey, R. C., Chen, Q., Harris, C. K., Hetland, R. D., Hu, K., & Wang, J. (2016). Shelf sediment transport during hurricanes katrina and rita. *Computers & Geosciences*, 90, 24–39.
- Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean waves*. Elsevier.
- Zhou, L.-m., Wang, A.-f., & Guo, P.-f. (2008). Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under typhoon wind forcing. *Journal of Hydrodynamics*, 20(6), 776–783.
- Zieger, S., Babanin, A. V., Rogers, W. E., & Young, I. R. (2015). Observation-based source terms in the third-generation wave model wavewatch. *Ocean Modelling*, 96, 2–25.